# IN PRINCIPIO

**Il desiderio di capire le origini – che si tratti dell'universo, della prima scintilla della vita o dei processi cognitivi alla base della mente umana – è una delle molle fondamentali dell'impresa scientifica**

Fu uno statista greco, vissuto nel VI secolo a.C., ad avanzare la prima descrizione non teologica dell'essenza di tutte le cose, viventi e inanimate. Talete di Mileto osservò infatti che l'acqua poteva esistere in forma liquida, solida o gassosa, e postulò che fosse il costituente fondamentale della materia, da cui tutto ciò che abitava la Terra – uomini, capre, fiori, rocce e quant'altro – era in qualche modo venuto fuori.

Come sempre accade quando si tratta di filosofia naturale (l'attività che oggi va sotto il nome di scienza), l'osservazione di Talete fu immediatamente messa in discussione. Anassimandro, suo discepolo (quello che ai giorni nostri chiameremmo un dottorando), chiese infatti come facesse l'acqua a essere l'unico elemento base quando le rocce, la sabbia e altri oggetti apparivano del tutto privi di umidità.

Nei successivi millenni, discussioni e litigi sulle origini e la natura della nostra esistenza non sono mai cessati, anche se della cosmologia dell'acqua di Talete resta soltanto una rapida citazione nelle storie della filosofia e della scienza. E la risposta definitiva su quale sia l'identità dell'ingrediente fondamentale della materia – e su come da questo ingrediente possa da ultimo emergere un mondo popolato da iPhone e repliche di vecchie serie televisive – continua a sfuggire ai filosofi naturali del nostro tempo.

All'inizio dello scorso aprile, 70 scienziati di grande prestigio si sono incontrati all'Università dell'Arizona per lanciare una «Iniziativa Origini», volta a approfondire una serie di questioni, come la possibilità che le nuove candidate a prendere il posto della visione di un mondo fatto di umidità proposta da Talete siano entità di dimensioni infinitesimali simili a stringhe. La spinta a dedurre quali siano stati gli inizi delle cose dà energia all'intera impresa scientifica, e non manca certo di riflettersi anche in biologia. Sembra appropriato il fatto che quest'anno il 150° anniversario della pubblicazione dell'*Origine delle specie* di Charles Darwin coincida con un significativo passo in avanti della ricerca che punta a al decisivo punto fermo della dimostrazione di come la vita stessa sia sorta dalla materia inanimata. Un chimico inglese ha infatti mostrato che uno dei fondamentali costituenti chimici della vita può formarsi spontaneamente a partire da una tiepida zuppa di composti organici.

L'immediato interesse di queste questioni ci ha convinto a dedicare questo numero speciale al tema delle origini nei campi della fisica, della biologia e della tecnologia. Nelle prossime pagine, un fisico si confronta con la questione di come abbia avuto inizio l'universo. Un biologo si occupa poi dei modi in cui potrebbe aver cominciato a emergere la vita, un filosofo della scienza prova a spiegare come potrebbe essere emersa la riproduzione sessuale e un altro biologo si misura con ciò che può aver reso la mente umana diversa da tutte le altre. Poi, uno storico della tecnologia considera il primo computer, che della mente umana è forse la più straordinaria invenzione. L'ampia sezione conclusiva offre brevi cronache degli inizi di decine di fenomeni fisici e biologici, e di una serie di notevoli invenzioni umane. Che si tratti dell'arcobaleno, degli antibiotici o dei biglietti di banca, i primi inizi – e le storie che ne nascono – continuano a essere un'inesauribile motivo di fascino del mondo che ci circonda.

*La redazione*

# TELAIO MECCANICO

## L'idea di una macchina programmabile fu di ispirazione per il pianoforte meccanico e per il computer

Jean-Charles Jacquard, maestro tessitore a Lione nel XVIII secolo, fabbricava non più di 15 centimetri di broccato di seta a settimana, e anche quella modesta quantità si poteva ottenere solo con l'aiuto di un apprendista che sedeva in cima al telaio di legno e sollevava uno alla volta i fili dell'ordito mentre il *maître* inseriva i fili colorati della trama. Tessere un disegno una linea alla volta era un'attività terribilmente noiosa, e questo spiega forse perché il figlio, Joseph-Marie, si tenne alla larga dal mestiere del padre già da prima che la Rivoluzione mettesse momentaneamente fuori moda il broccato. Dopo aver dilapidato l'eredità di famiglia, però, il giovane Jacquard ci ripensò; ma invece di diventare tessitore decise di inventare una macchina che semplificasse il lavoro. L'idea di Jacquard fu di stampare i disegni del broccato su schede perforate che venivano poi inserite nel telaio, con una scheda per ogni linea di tessuto. Il telaio leggeva la disposizione dei fori praticati su ciascuna scheda grazie a una matrice di piccoli aghi spinti da molle e collegati a ganci, ognuno dei quali sollevava un filo dell'ordito nel punto in cui l'ago entrava nel foro. In questo modo il telaio poteva essere programmato e i disegni cambiati mescolando o sostituendo la pila di schede. Brevettato nel 1804, un telaio Jacquard operato da un esperto era in grado di produrre 60 centimetri di broccato al giorno, una quantità così impressionante da meritare una visita da parte di Napoleone. Nemmeno l'ambizioso imperatore poteva però immaginare il significato dell'invenzione di Jacquard per le generazioni future. Le schede perforate, infatti, erano la soluzione perfetta per sviluppare innumerevoli tipi di macchine programmabili. All'interno del meccanismo pneumatico di una pianola, per esempio, un rotolo perforato poteva eseguire una toccata di Bach, mentre un altro produceva un ragtime di Gershwin.

Ancora maggiore fu la versatilità di questa invenzione nel campo dei calcolatori, come comprese nel XIX secolo lo scienziato britannico Charles Babbage progettando la sua Macchina Analitica, e negli anni trenta del XX secolo l'ingegnere americano Howard Aiken costruendo per l'IBM l'Harvard Mark I. Seguendo l'intuizione di Babbage, Aiken assemblò pile di schede perforate e le fece lavorare in tandem, in modo che una pila applicasse l'operazione ai dati letti dall'altra pila.

Nei computer moderni le schede non ci sono più (e nemmeno gli interruttori elettromeccanici di Aiken), ma l'architettura è essenzialmente la stessa. E benché i telai industriali non siano più operati da maestri della tessitura, l'innovazione di Jacquard ha portato l'industria tessile a livelli mai visti di efficienza, ispirando i telai a controllo computerizzato. *Jonathon Keats*

IL TELAIO JACQUARD, brevettato nel 1804, fu inventato per ridurre la manodopera. Questo esemplare veniva ancora usato negli anni sessanta in una fabbrica di tessuti in Mongolia.

# MUCCA PAZZA

## Le conseguenze del cannibalismo sull'allevamento

La storia della malattia della «mucca pazza» è un chiaro esempio del perché non è una buona idea nutrirsi degli individui della propria specie. Nel caso delle mucche, poi, il cannibalismo non ha niente a che vedere con la sopravvivenza o con macabri riti tribali, ma solo con l'economia.

Le prime «mucche pazze» (il nome ufficiale della malattia è encefalopatia spongiforme bovina) furono identificate nel 1984 in Gran Bretagna. Gli animali erano stati contagiati probabilmente anni prima consumando mangimi contenenti parti di ovini, bovini e suini che non avevano mercato (diaframmi, mammelle, spine dorsali, cervella e così via). Il processo attraverso cui si separano parti macinate di animali macellati da destinare alla produzione di mangimi (e di altre merci come il sapone e la cera) è detto *rendering*, ed esiste da centinaia di anni.

A metà del XX secolo, nel Regno Unito il rendering comportava l'uso di solventi e diverse ore di bollitura, che presumibilmente distruggevano qualsiasi patogeno presente nelle carni di un animale malato: patogeni come il prione, una versione alterata e pericolosa di una proteina presente in tutti i mammiferi. Ma negli anni settanta il prezzo del petrolio aumentò di colpo, arrivando nel 1980 a costare dieci volte di più. Unito a una fase economica di stagnazione, questo fatto portò le aziende di rendering a cercare di abbassare i costi.

Si iniziò quindi a fare a meno dei solventi e della bollitura, preferendo separare le varie parti con l'uso di centrifughe. E l'eliminazione delle fasi di cottura permise ai prioni di permanere. Secondo alcuni, i primi prioni provenivano da un animale che aveva sviluppato spontaneamente la malattia; secondo un'altra ipotesi, invece, la scrapie (una malattia prionica delle pecore diffusa da secoli nel Regno Unito ma che non aveva mai posto problemi agli esseri umani) aveva effettuato il salto di specie, infettando alcuni bovini. Le carcasse degli animali infetti furono usate per produrre mangimi somministrati ad altre mucche come fonte di proteine a basso prezzo, amplificando così l'epidemia. Qualcosa di simile era avvenuto agli inizi del XX secolo nel villaggio di Fore, in Papua Nuova Guinea, dove i riti funebri cannibalistici praticati dalla popolazione locale avevano contribuito a diffondere una malattia prionica fatale chiamata kuru.

In Gran Bretagna e in molti altri paesi (l'esportazione dei mangimi contaminati aveva diffuso la malattia a livello globale) l'epidemia è cessata non appena i governi hanno proibito l'uso di farine animali nei mangimi. L'anno scorso si sono registrati solamente 125 casi in tutto il mondo, decisamente pochi rispetto ai 37.000 del 1992. Le leggi sono purtroppo arrivate troppo tardi per salvare le 200 persone che avevano già contratto la forma umana della malattia, ma la tragedia è stata comunque evitata, se si considera che decine di milioni di persone hanno probabilmente mangiato carne di animali infetti. *Philip Yam*

# FOTOSINTESI

## La reazione che rende verde il mondo è soltanto una delle molte varianti possibili

Quando il sole splende, le piante verdi scindono le molecole d'acqua per ricavare elettroni e protoni; poi usano queste particelle per trasformare l'anidride carbonica in glucosio ed emettono ossigeno come prodotto di scarto. Tra le varie forme di fotosintesi (la reazione mediante la quale determinate lunghezze d'onda della luce vengono trasformate in energia chimica), questa è senz'altro la più complessa e diffusa. (Secondo alcuni studi esisterebbero funghi unicellulari in grado di usare anche l'elevata energia dei raggi gamma; colonie di questi organismi sono state trovate nei reattori nucleari di Chernobyl.)

L'uso dell'acqua come reagente, al posto di sostanze più rare come l'acido solfidrico, ha permesso alla vita di espandersi e occupare praticamente ogni angolo del pianeta. La fotosintesi basata sulla scissione dell'acqua è stata «inventata» dai progenitori degli odierni cianobatteri, e gli organismi che oggi compiono questo tipo di fotosintesi, tra cui le piante, le alghe verdi e almeno un animale (la lumaca marina *Elysia chlorotica*), hanno organelli chiamati cloroplasti che sembrano essere i discendenti di antichi cianobatteri simbiotici.

Tutti sfruttano il pigmento clorofilla in una delle sue forme, a volte in combinazione con altri pigmenti. Durante la fotosintesi le molecole di clorofilla assorbono i fotoni e ne usano l'energia per scindere l'acqua. L'acqua è però una molecola particolarmente impegnativa per la fotosintesi. Prelevare gli elettroni dall'acqua e fornire loro energia sufficiente per produrre glucosio richiede infatti due gruppi distinti di molecole di clorofilla leggermente diverse, nonché una struttura formata da più di 100 diversi tipi di proteine.

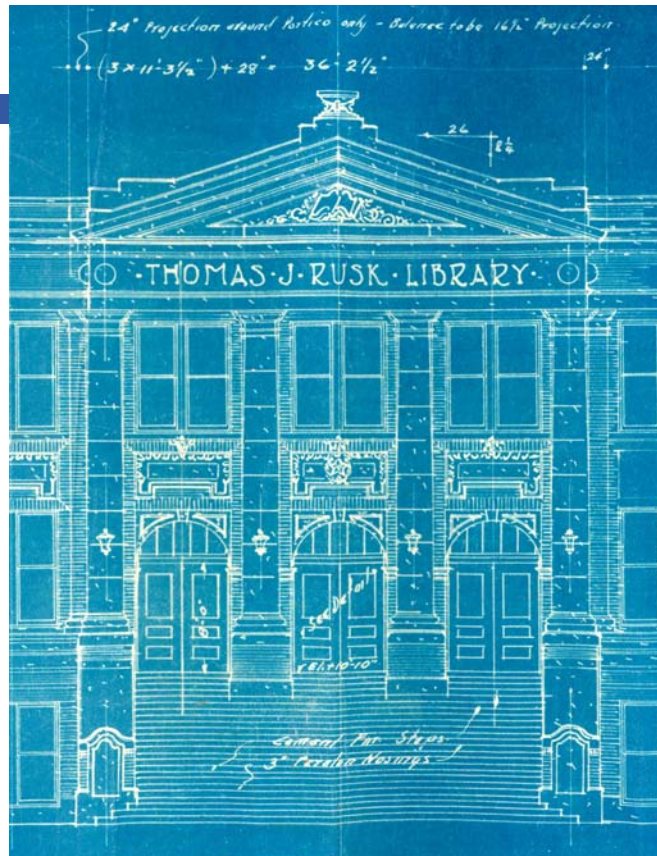
Esistono però anche forme più semplici di fotosintesi, che usano soltanto una delle due versioni di clorofilla. Il problema è quale delle due forme sia apparsa prima nel corso dell'evoluzione e come abbiano fatto a combinarsi tra loro. «È una questione a cui non abbiamo risposta», spiega Robert Blankenship della Washington University a Saint Louis. Un altro interrogativo riguarda il periodo in cui i cianobatteri hanno imparato a scindere l'acqua. In base ad alcune osservazioni, ciò potrebbe essere avvenuto già 3,2 miliardi di anni fa, e di certo non più recentemente di 2,4 miliardi di anni fa, quando l'ossigeno, da gas raro, è passato a essere il secondo gas più abbondante nell'atmosfera. Senza questo importante cambiamento, gli animali pluricellulari più complessi, soprattutto quelli in grado di formulare domande scientifiche, non sarebbero mai esistiti. *Davide Castelvecchi*

## CIANOTIPIA

### Nata da un fallimento, fu a lungo insostituibile per la riproduzione delle planimetrie

«Questa carta si rivelerà preziosa», scrisse il 23 aprile 1842 John Herschel dopo aver notato gli effetti della luce solare su un campione trattato con «ferrocianato di potassa». La luce aveva colorato la carta di blu, inducendo Herschel a pensare di aver scoperto le basi della fotografia a colori. Purtroppo si sbagliava, ma la sua scoperta si sarebbe rivelata molto utile in altri campi. Nel 1839 Herschel, astronomo e chimico britannico, aveva avuto un ruolo cruciale nell'invenzione della calotipia in bianco e nero (il primo negativo fotografico), quando aveva trovato il modo di fissare le immagini con il tiosolfato di sodio. La sua ossessiva ricerca di nuove sostanze fotosensibili lo aveva portato a sperimentare qualsiasi cosa, dagli estratti vegetali all'urina di cane, fino ad arrivare a un nuovo farmaco, il ferrocianato di potassa, oggi chiamato ferrocianuro di potassio. Il ferrocianato, soprattutto se combinato con un altro farmaco chiamato citrato ferrico di ammonio, produceva un'immagine ben definita che rimaneva permanente dopo il lavaggio.

Herschel chiamò la sua invenzione «cianotipo», ma ne fu molto insoddisfatto, perché non gli consentiva di ottenere un'immagine positiva stabile, ma solo negativi. La maggior parte dei fotografi fu della sua stessa opinione, preferendo il tradizionale bianco e nero a quella strana sfumatura blu. Fu solo nel 1872, un anno dopo la morte di Herschel, che il cianotipo venne rivalutato. Un'azienda di Parigi, la Marion & Company, ribattezzò la sua invenzione «carta al prussiato di ferro» e iniziò a venderla per la riproduzione delle planimetrie architettoniche (in precedenza le copie erano eseguite a mano, con costi elevati e grandi possibilità di errore).

Nel 1876, alla Centennial Exposition di Philadelphia, il processo fu introdotto negli Stati Uniti, dove riscosse un enorme successo come il primo sistema economico per la duplicazione dei documenti. L'unico requisito era che il disegno originale fosse eseguito su carta traslucida; questa, messa sopra un foglio rivestito con il composto di Herschel e premuta per mezzo di un vetro, veniva esposta alla luce solare e successivamente lavata in acqua. Nel risultante cianotipo i colori risultavano invertiti, e le linee nere apparivano bianche su sfondo blu.

Per quasi un secolo i laboratori di cianotipia hanno prosperato nei piani più alti degli edifici, dove la luce era più abbondante. Successivamente, tra gli anni cinquanta e settanta, hanno gradualmente lasciato il posto a processi meno laboriosi, come la diazotipia e la fotocopia; oggi la maggior parte dei progetti di architettura viene renderizzata in digitale. Herschel, che non riuscì mai a ottenere stampe a colori, sarebbe rimasto sbalordito dalla gamma cromatica prodotta dalle moderne stampanti laser. *Jonathon Keats*

## PIUME

### Comparse molto prima dello sviluppo delle ali, hanno preceduto gli uccelli di milioni di anni

Il *Tyrannosaurus rex* verde e squamoso dei film di mostri appartiene ormai al mondo della fiction. Il vero *T. rex* era probabilmente avvolto da una coltre di soffici piume, come lo erano quasi tutti i dinosauri della sua famiglia, i teropodi, da cui si sono successivamente sviluppati gli uccelli. In Cina, infatti, da alcuni giacimenti fossili sono stati estratti campioni che confermerebbero come un gran numero di dinosauri prettamente terricoli fosse ricoperto di piume già durante il Cretaceo, circa 125 milioni di anni fa.

Dallo studio di questi fossili e dello sviluppo delle piume negli uccelli moderni, i ricercatori sono riusciti a ricostruire le probabili fasi dell'evoluzione delle piume. Le prime protopiume erano poco più che aculei concavi di cheratina, la proteina dura che forma anche squame, zoccoli e peli. A un certo punto questi aculei hanno sviluppato ramificazioni laterali, che si sono poi suddivise in filamenti, e si sono aperti lungo l'asse verticale, formando strutture simili a nappe. Recentemente sono state trovate piume caudali lunghe e filamentose nel fossile di un dinosauro appartenente all'ordine degli ornitischi, che si separò dai futuri teropodi 70 milioni di anni prima del Cretaceo. In base a questa scoperta, quindi, le piume potrebbero essere una struttura molto antica e molto diffusa.

La funzione originaria delle piume potrebbe essere stata quella di mantenere il calore senza pesare troppo, ma, considerando le colorazioni sgargianti e i complessi disegni degli uccelli moderni, non è escluso che avessero anche un ruolo nel corteggiamento.

Da notare che non tutti i colori delle piume sono prodotti da pigmenti. Nanostrutture di cheratina all'interno delle piume intrappolano l'aria e diffondono determinate lunghezze d'onda della luce, a seconda della loro forma. Il blu intenso dell'uccello azzurro orientale, per esempio, è prodotto da canalicoli contorti pieni d'aria e barre di cheratina. Uno studio più approfondito di come queste nanostrutture si autoassemblano in natura potrebbe ispirare nuove tecniche per la produzione di materiali colorati e luminescenti. *Christine Soares*

Cortesia Center for East Texas Studies/Stephen F. Austin State University (*ciano*); Corbis (*piuma*)

## OSSA

### Struttura, forza e riserve minerali in un unico tessuto

Una riunione sociale durante il periodo Cambriano, iniziato circa 540 milioni di anni fa, probabilmente assomigliava a un gioco di guerra acquatico; all'epoca, infatti, tutte le forme di vita abitavano nei mari, e quasi tutte erano dotate di qualche forma di corazza esterna. Gli antenati degli insetti e dei crostacei avevano esoscheletri completi, composti probabilmente da una combinazione di proteine e chitina, come il carapace delle moderne aragoste. I molluschi e alcuni organismi simili alle stelle di mare producevano la propria corazza con il carbonato di calcio estratto dall'acqua. Persino gli ostracodermi, un gruppo simile ai pesci oggi estinto, riuscivano a nuotare nonostante la pesante copertura di squame e placche di vero osso (ossia cartilagine mineralizzata ricca di calcio e fosfati).

Tuttavia fu nelle creature più indifese e mansuete del Cambriano che si svilupparono i primi scheletri interni. Organismi simili ai vermi, come i conodonti (si veda *I denti*, a p. 95), iniziarono a mineralizzare la cartilagine che circondava le loro primitive spine dorsali, diventando di fatto i primi vertebrati. Successivamente comparvero le prime coperture ossee simili a crani, seguite da scheletri interni cartilaginei più sviluppati. Poiché quei nuotatori si muovevano grazie alle contrazioni muscolari, un ancoraggio più solido per i muscoli avrebbe potuto fornire loro maggiore forza. Uno scheletro più duro rappresentava inoltre un'impalcatura più solida, utile per accrescere le proprie dimensioni e sviluppare arti.

L'evoluzione del ruolo di deposito di minerali cruciali, soprattutto di calcio, avvenne probabilmente in un secondo tempo, e rappresenta oggi una delle funzioni più importanti dello scheletro umano. Senza calcio, il cuore cesserebbe di battere e i neuroni non potrebbero funzionare. Lungi dall'essere un tessuto inerte, infatti, le ossa sono in costante equilibrio tra la crescita e l'autodistruzione per soddisfare le esigenze del corpo e mantenerne la struttura. Cellule chiamate osteoclasti («distruttori di ossa») demoliscono il tessuto osseo vecchio o morto, mentre gli osteoblasti («costruttori di ossa») creano nuovo tessuto; lavorando insieme, ogni anno queste cellule sostituiscono circa il 10 per cento dello scheletro. Inoltre, quando i livelli di calcio si abbassano eccessivamente, gli osteoclasti demoliscono le ossa per rilasciarne il minerale. Allo stesso modo, se l'attività fisica produce muscoli più grandi, gli osteoblasti si mettono al lavoro per costruire ossa in grado di sostenerli. *Christine Soares*

## AIDS E HIV

### Sapere che il virus viene dalle scimmie potrebbe aiutarci a sconfiggerlo

La sindrome da immunodeficienza acquisita (AIDS) ricevette il suo nome nel 1982, un anno dopo che un gruppo di medici statunitensi aveva preso atto della presenza di un'inspiegabile epidemia di polmoniti, rari tumori e infezioni batteriche di vario tipo in una popolazione di adulti quasi tutti maschi, giovani e in precedenza sani. L'anno successivo, ricercatori francesi isolarono la causa di quel collasso del sistema immunitario: un virus che, in maniera selettiva, infettava e distruggeva le cellule immunitarie stesse.

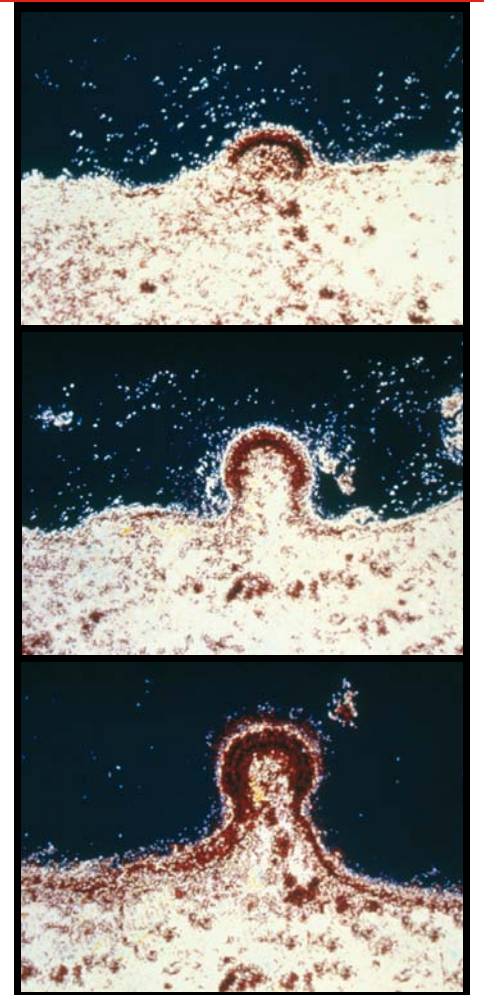
Il virus dell'immunodeficienza umana (HIV), che oggi infetta più di 30 milioni di persone e che all'inizio degli anni ottanta sembrò apparire dal nulla, in realtà ha infettato gli esseri umani per almeno un secolo. Studi compiuti di recente su campioni di tessuto dimostrano che l'HIV era presente nell'ex Congo belga già nel 1959, ad Haiti nel 1966 e probabilmente anche negli Stati Uniti già nel 1969. Quei campioni hanno inoltre consentito agli scienziati di calibrare i loro «orologi molecolari» e di risalire alla prima comparsa del virus negli esseri umani.

Da queste analisi è risultato che il ceppo più diffuso di HIV, conosciuto come Gruppo M, comparve in Camerun intorno al 1908. Un altro recente studio basato sull'orologio molecolare ha indicato che il suo progenitore fu probabilmente un virus diffuso tra gli scimpanzè dell'Africa occidentale fin dal 1492. Se così fosse, molti abitanti delle aree rurali sono stati esposti per secoli alla sindrome da immunodeficienza delle scimmie (SIV), sia attraverso il contatto diretto con gli animali sia attraverso il consumo della loro carne, ben prima dell'esplosione dell'attuale pandemia.

Gli scienziati sono quindi alla ricerca dei fattori che hanno consentito ad alcuni ceppi di SIV di adattarsi alla nostra specie e trasformarsi in HIV. I ricercatori stanno anche studiando in maniera intensiva il comportamento del SIV nei suoi ospiti originari, perché questo virus, pur essendo quasi identico all'HIV, negli scimpanzè selvatici è in genere benigno: le cellule immunitarie di questi primati vengono infettate, ma riescono a reagire e a ricostituirsi. Le origini di quella devastante sindrome che è l'AIDS devono quindi risiedere in qualche combinazione di minuscoli cambiamenti nell'HIV stesso (e nella risposta a esso da parte del corpo umano), e rimangono ancora un mistero. *Christine Soares*

UNA PARTICELLA DI HIV appena formata emerge da una membrana cellulare. Il virus sfrutta le cellule immunitarie per replicarsi, causandone la morte.

PHoto Researchers, Inc.

# ORIGINI

## PENSIERO RELIGIOSO

### La fede nel soprannaturale potrebbe essersi sviluppata dalle componenti più elementari della cognizione umana

Possiamo dubitare dell'esistenza di Dio, ma non di quella di coloro che credono in Lui. Considerando che quasi ogni civiltà adora qualche varietà di potere soprannaturale, ne deriva che gli esseri umani sono geneticamente predisposti a credere in qualcosa che, per definizione, non è di questo mondo. Ma per quale ragione? In termini evoluzionistici, in quale modo credere in qualcosa in assenza di prove fisiche ha contribuito alla sopravvivenza dei primi *Homo sapiens*?

I biologici evoluzionisti Stephen Jay Gould e Richard Lewontin, della Harvard University, hanno formulato l'ipotesi che il pensiero religioso sia un effetto collaterale di caratteristiche che contribuiscono più concretamente alla sopravvivenza degli esseri umani. Forse la più primitiva tra queste è la nostra capacità di rilevare la presenza di altri esseri viventi. Se udiamo in distanza un fruscio nell'erba, il nostro istinto ci dice che potrebbe esserci qualcosa o qualcuno in agguato. Questa inclinazione implica ovvi vantaggi evoluzionistici: se abbiamo ragione, ci siamo appena messi in allarme nei confronti di un predatore. (Se invece ci sbagliamo, significa che possiamo tranquillamente tornare a raccogliere bacche.)

Inoltre gli esseri umani costruiscono istintivamente narrazioni allo scopo di dare un senso a quello che potrebbe sembrare un miscuglio sconnesso di eventi. Nassim Nicholas Taleb, autore di *Il cigno nero. Come l'improbabile governa la nostra vita* e docente di ingegneria del rischio, definisce questo processo «narrazione fallace»: inventiamo storie causa-effetto per spiegare il mondo che ci circonda, anche quando le circostanze sono chiaramente frutto del caso. Gli dèi, dotati di onnipotenza e non soggetti a indagine o ricerca, possono essere usati per spiegare qualsiasi evento misterioso.

Infine l'uomo è in grado di immaginare i pensieri e le intenzioni altrui e concepire che siano diversi dai propri, un tratto noto come teoria della mente. Questa capacità, gravemente compromessa nei bambini autistici, è così fondamentale allo status di essere umano che si può definire una precondizione necessaria alla civilizzazione. Tra l'immaginare la mente di un'altra persona – pur non avendo un accesso diretto a essa – e l'immaginare la mente di una divinità Il passo è breve.

Nel loro complesso, gli adattamenti evolutivi che hanno fatto fiorire il giardino della società umana hanno fornito un terreno fertile anche per la fede in Dio. Naturalmente è impossibile trasportarci agli albori della civilizzazione per verificare in modo rigoroso queste idee; limitiamoci quindi a prendere atto dell'esistenza di un'altra idea sul divino in attesa di essere verificata. *Michael Moyer*

## IL COLORE BLU

### Un pigmento naturale che un tempo fu un colore «prezioso»

Cercate il blu perfetto? Dovrete essere più precisi. Cobalto, prussiano, azzurrite od oltremare? Secondo il libro di Philip Ball *Colore: una biografia,* se foste un artista del XIV secolo, il blu più bello potrebbe costarvi una fortuna. Non siamo nemmeno in grado di riprodurlo in questa rivista: non fa parte della gamma che può essere riprodotta dai quattro «colori di processo» della stampa normale.

Il blu più antico ottenuto dall'uomo – il più antico pigmento sintetico – è il blu «egiziano». I coloristi dell'epoca cuocevano in una fornace un misculglio composto per una parte di limo, una parte di ossido di rame e quattro parti di quarzo, ottenendo così un materiale blu opaco che poteva essere ridotto a una polvere fine per produrre il colore da usare. Questo materiale si ritrova sui manufatti egiziani risalenti a un'epoca intorno al 2500 a.C., ed era ancora in uso quando l'eruzione del Vesuvio seppellì Pompei nel 79 d.C.

Nel Medio Evo il colore divenne il perno intorno a cui ruotava l'ossessione degli alchimisti per la trasmutazione, e il loro grande contributo al blu degli artisti fu l'oltremare. Si ricava dal lapislazzuli, una pietra estratta soprattutto in Afghanistan. Il costoso minerale e la sua complessa lavorazione – una lunghissima procedura di impasto e lavaggio nella liscivia della polvere di lapislazzuli – portarono a quella tonalità di blu profonda, ricca e scura che si vede in molti dipinti che raffigurano il manto della Vergine. Il committente di una pittura medievale che poteva permettersi una Vergine vestita in blu oltremare dimostrava la devozione di un arcivescovo e la ricchezza di un moderno magnate della finanza.

Nel XIX secolo, nonostante la disponibilità di diversi blu alternativi, gli artisti erano ancora alla ricerca di un surrogato meno costoso della tonalità oltremare. Nel 1824 la Società francese per lo sviluppo dell'industria nazionale offrì 6000 franchi per un processo industriale che riuscisse a produrre un pigmento oltremare sintetico a meno di 300 franchi al chilo. Fu un produttore di nome Jean-Baptiste Guimet ad aggiudicarsi il premio, e intorno al 1870 il fascino un po' snob del pigmento naturale era ormai svanito, ucciso dal tempo e da un prezzo che era da 100 a 2500 volte più alto rispetto alla sua variante sintetica. L'oltremare industriale divenne il blu usato nelle opere degli impressionisti, come Renoir, Cézanne e van Gogh. *Peter Brown*

## REGISTRAZIONI SONORE

### Le prime registrazioni sono rimaste in silenzio per 150 anni

Nel IX secolo alcuni studiosi persiani inventarono il primo strumento musicale meccanico di cui si ha notizia, un organo idroalimentato che riproduceva musica prestampata su un cilindro rotante. Ci sarebbero voluti altri mille anni prima che gli inventori scoprissero il processo inverso: stampare i suoni su un dispositivo capace di memorizzarli.

La prima macchina in grado di catturare la musica fu inventata nel 1857 da Édouard-Léon Scott de Martinville. L'apparecchio si serviva di un corno che catturava le onde sonore e le dirigeva su un piccolo diagramma, a cui era attaccata una puntina che incideva una «registrazione» delle stesse su un cilindro di vetro rotante, annerito dal fumo di una lampada a olio. Il dispositivo dimostrò che era possibile registrare il suono, ma rimase una curiosità storica per una semplice ragione: non riusciva a riprodurre i brani che aveva registrato. (Almeno non fino allo scorso anno, quando ricercatori del Lawrence Berkeley National Laboratory sono riusciti a decifrare le incisioni e hanno riprodotto alcuni secondi di *Au Clair de la Lune,* cantata nel 1860).

L'apparecchio di de Martinville è rimasto una curiosità, ma la sua architettura elementare costituita da corno, diagramma, puntina e cilindro è stata la base di tutte le registrazioni sonore dei successivi settant'anni. Nel 1874, prima di passare al telefono, Alexander Graham Bell sperimentò la registrazione di suoni usando l'architettura di de Martinville, salvo il fatto che si servì dell'orecchio di un cadavere.

Tre anni dopo Thomas A. Edison (*a destra*) mentre cercava il modo di registrare i suoni prodotti dal telefono di Bell, passò alla registrazione del suono nell'aria. Il suo apparecchio era quasi identico a quello di de Martinville, ma usava fogli di alluminio come superficie di registrazione, in modo da permettere la riproduzione. Nel dicembre 1877 brevettò il fonografo e lo stesso mese portò l'apparecchio alla redazione di «Scientific American». Che scrisse: «A prescindere dalla familiarità che possiamo avere con i macchinari moderni e le loro meravigliose manifestazioni… è impossibile ascoltare la voce meccanica senza provare la sensazione che i nostri stessi sensi ci stiano ingannando». *Michael Moyer*

## MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA

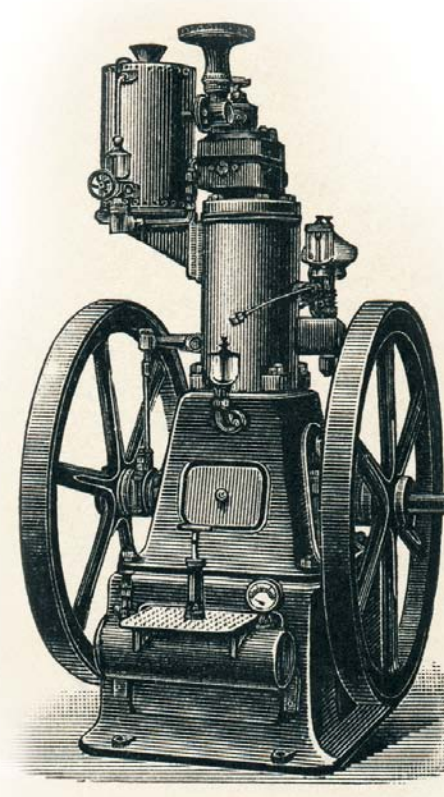
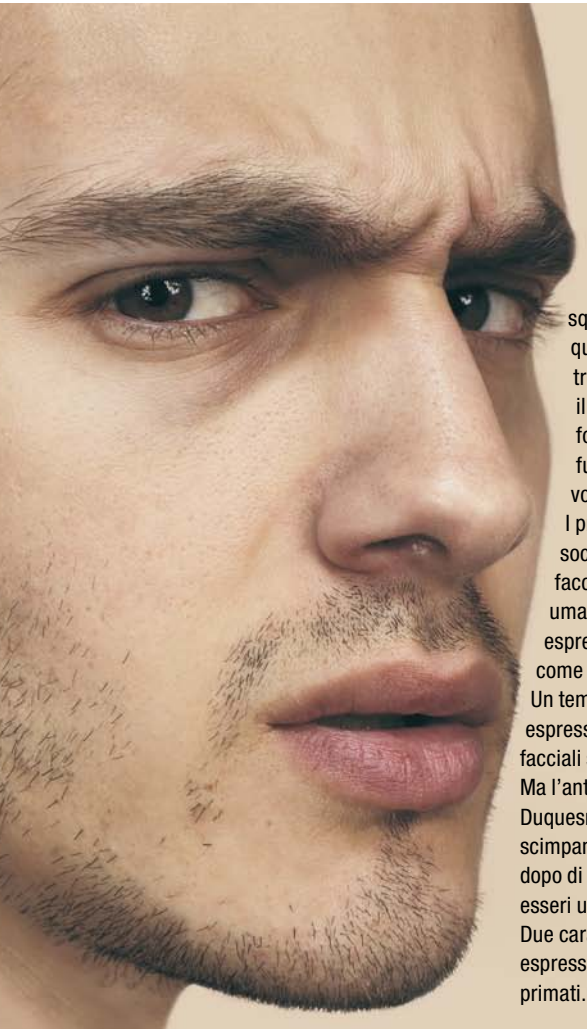
### Da 130 anni alimenta il parco veicoli del pianeta

Quasi ogni veicolo oggi sulla strada è alimentato da una versione del motore a combustione interna a quattro tempi brevettato da Nikolaus Otto nel 1876 (*a destra*). Otto sfruttò le scoperte del fisico francese Sadi Carnot, che nel 1824 dimostrò che l'efficienza di un motore dipende essenzialmente dal differenziale di temperatura tra una «fonte» calda di energia e un «bacino» freddo. Il motore a quattro tempi comprime una miscela di aria e carburante e innesca la combustione mediante una scintilla, generando una fonte di calore fugace ma intensa. Da allora nient'altro ha raggiunto la stessa efficienza «trasportabile».

Qualcuno considera però il motore a combustione interna un anacronismo, residuo pericolosamente superato di un mondo convinto dell'inesauribilità del petrolio e dell'immutabilità del clima.

La speranza migliore per sostituirlo sembra essere un motore elettrico alimentato da una riserva energetica come batterie chimiche o una cella a combustibile a idrogeno. Spesso, tuttavia, si dimentica che i veicoli elettrici hanno già avuto la loro occasione: alla fine del XIX secolo e nei primi anni del XX erano molto più popolari delle automobili alimentate a benzina. Potevano funzionare tutto il giorno con una sola carica e consentivano facili spostamenti all'interno di una città. Non avevano bisogno di una manovella a mano per mettersi in moto e non avevano marce da cambiare, tutte cose che rendevano i veicoli a benzina dell'epoca assolutamente poco maneggevoli.

I veicoli elettrici, però, erano più adatti al mondo di quei tempi. Quelle prime automobili potevano girare tutto il giorno con una sola carica perché i limiti di velocità erano tra i 10 e i 20 chilometri orari, per adattarsi alle carrozze trainate dai cavalli. Quando i limiti furono elevati, dopo la prima guerra mondiale, e i viaggi tra una città e l'altra divennero la norma, i veicoli a benzina iniziarono a dominare il mercato.

Da allora i produttori di auto hanno investito miliardi su miliardi per aumentare l'efficienza del moderno motore a quattro tempi. Fino a quando le auto elettriche non riusciranno a superare la potenza e la gamma di veicoli consentite dalla benzina, aspettiamoci che il motore a combustione interna continui a regnare indisturbato. *Michael Moyer*

Sheila Terry/Photo Researchers, Inc. (*motore*); Susanna Price/Getty Images (*polvere blu*); Granger Collection (*Edison*)

## ESPRESSIONI DEL VOLTO

### La nostra espressività potrebbe risalire a tre milioni di anni fa

Due occhi sopra un paio di narici, a loro volta collocate sopra una bocca: è la struttura del volto dei vertebrati, dagli squali agli esseri umani. Ma per quanto questa disposizione sia ottimizzata per trovare e ingoiare cibo, nei mammiferi il volto ha assunto un'altra funzione fondamentale: la comunicazione. Una funzione che si manifesta al massimo nel volto umano.

I primati in generale hanno una vita sociale complessa, e usano le espressioni facciali nelle interazioni reciproche. Noi umani abbiamo volti particolarmente espressivi con cui trasmettiamo emozioni come paura, felicità, tristezza e rabbia.

Un tempo si collegava il ricco repertorio di espressioni umane al fatto di avere muscoli facciali specializzati in modo caratteristico. Ma l'antropologa fisica Anne Burrows, della Duquesne University, ha scoperto che lo scimpanzé – il più espressivo dei primati dopo di noi – differisce pochissimo dagli esseri umani nella muscolatura del muso. Due caratteristiche, tuttavia, separano le espressioni facciali umane da quelle degli altri primati. Anzitutto noi abbiamo una sclera (la parte bianca del bulbo) tutt'intorno all'iride. Secondo, le nostre labbra sporgono dal viso e sono più scure della pelle circostante. Questi tratti forniscono alle espressioni del nostro volto forti contrasti visivi che riescono a trasmettere meglio i nostri sentimenti.

Non sono noti il momento esatto e le modalità con cui gli esseri umani hanno sviluppato volti tanto animati, ma nei crani fossili dei nostri antenati si possono trovare importanti indizi. Gli endocalchi – calchi dell'impressione che il cervello lascia all'interno del cranio – possono dirci qualcosa sulle capacità di cambiamento delle regioni cerebrali nel corso del tempo. Nel 2000 il paleoneurologo Dean Falk, ora alla Florida State University, condusse un'analisi di endocalchi dell'antico ominide *Australopithecus africanus*, vissuto tra 3 e 2 milioni di anni fa. I risultati mostrarono che parti della regione temporale anteriore di quella creatura erano più ampie rispetto a quelle delle scimmie. Quell'evoluzione potrebbe aver migliorato la capacità di elaborazione delle informazioni sui volti di questo nostro predecessore. Se così fosse, la nostra tendenza a produrre e capire le espressioni facciali potrebbe avere radici molto profonde.

*Kate Wong*

## RAGGI GAMMA

### È noto che per crearne uno bisogna distruggere qualcosa: che si tratti di una singola particella o di un'intera stella

I raggi gamma sono paragonabili ai ghepardi: sono la megafauna carismatica del mondo delle particelle. Sono la luce alla più alta energia possibile, solitamente definita come una lunghezza d'onda inferiore a $10^{-11}$ metri: un regno in cui la natura ondulatoria della luce è difficile da osservare, mentre ne emerge la natura di particella. Ogni fotone gamma ha un'energia di oltre 100 chiloelettronvolt (keV), vale a dire 100.000 volte maggiore di un fotone di luce visibile. Il raggio gamma più potente mai registrato aveva un'energia di 100 teraelettronvolt (TeV), di gran lunga superiore a qualsiasi esplosione che i fisici delle particelle riescano a produrre con il loro strumento più potente, il Large Hadron Collider.

Per generare particelle così estreme sono necessari processi altrettanto estremi: la collisione di particelle che si muovono quasi alla velocità della luce; l'annichilazione di materia e antimateria, che converte la loro massa in energia secondo la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$; l'emissione di energia dai buchi neri; il rilascio di energia nucleare nel decadimento radioattivo o nelle reazioni di fusione. (Tecnicamente, tutti i fotoni emessi dai nuclei atomici sono classificati come raggi gamma, anche i rari inferiori a 100 keV.) Per quanto estremi siano questi processi, ci crogioliamo nel loro splendore ogni giorno: la luce solare ha avuto origine come radiazione gamma nel nucleo del Sole e si è degradata fino a diventare luce visibile durante il suo tortuoso passaggio attraverso i soprastanti strati di gas.

I raggi gamma di maggiore interesse per gli astronomi, tuttavia, provengono da cose morte, che stanno morendo o che sono mortali. Quando una grande stella esplode in una supernova, i suoi detriti brillano di raggi gamma, e il cadavere stellare che resta – una stella di neutroni o un buco nero – ha una gravità così intensa da alimentare la generazione continua di raggi gamma. Al centro delle galassie, buchi neri supermassicci attirano materiale al loro interno, una parte del quale non completa l'intero percorso, ma fuoriesce sotto forma di getti che innescano onde d'urto e generano raggi gamma.

Di alcuni raggi gamma non è stata ancora individuata la fonte, ma si pensa che possano provenire dal decadimento o dall'annichilazione di particelle sconosciute. Se è vero che di notte il cielo stellato ha un aspetto calmo e sereno, i raggi gamma tradiscono la reale natura violenta dell'universo che ci circonda.

*George Musser*

Jason Hetherington/Getty Images

Ellinor Hall/Getty Images (*Sole*); Getty Images (*cioccolato*)

## LUCE

### Non è comparsa come il veloce scatto di un interruttore, ma come il lentissimo levarsi dell'alba

Nel *Libro della Genesi*, Dio non dovette fare altro che pronunciare il Verbo. Nella cosmologia moderna, la creazione della luce ha richiesto uno sforzo più intenso. Le qualità della luce a noi familiari – un'onda elettromagnetica, un flusso di particelle chiamate fotoni, una fonte di informazioni sul mondo – si sono manifestate in varie fasi nel corso dei primi millenni della storia cosmica.

Al principio di tutto, l'elettromagnetismo non operava come forza indipendente, ma interagiva con la forza nucleare debole che governa il decadimento radioattivo. La combinazione di queste forze elettrodeboli generò un fenomeno riconoscibile come luce, ma più complesso. Per esempio non c'era un'unica forma di luce primordiale, ma ne esistevano due, costituite da particelle note come bosoni $B$ e $W$. Entro $10^{-11}$ secondi l'universo si era raffreddato abbastanza perché l'elettromagnetismo si separasse dalla forza debole e i bosoni si riconfigurassero per dar vita ai fotoni.

I fotoni subirono un forte rimescolamento con particelle di materia come i quark, insieme ai quali formarono un brodo indifferenziato. Se fossimo stati presenti, avremmo visto un bagliore accecante e indistinto tutt'intorno a noi. Privo di variazioni di colore o di brillantezza, non sarebbe stato luminoso, bensì simile all'oscurità più assoluta. I primi oggetti con una struttura interna non emersero fino a 10 microsecondi, quando i quark si agglomerarono in protoni e neutroni, e a 10 millisecondi, quando i protoni e i neutroni iniziarono a costituire i nuclei atomici. Soltanto allora la materia iniziò a lasciare una traccia distintiva sulla luce.

Circa 380.000 anni dopo il big bang il brodo si scompose, e la luce si disperse attraverso lo spazio in linee più o meno rette, fino a essere in grado di illuminare oggetti e formare immagini. Mentre questa luce primordiale si affievoliva e si spostava verso il rosso, l'universo attraversò un periodo oscuro detto *Dark Age*. Infine, a un'età di 300 milioni di anni circa, si accesero le prime stelle e l'universo divenne capace di generare nuova luce. Nella *Genesi*, la luce emerse prima della materia, ma in fisica le due cose sono emerse contemporaneamente.

*George Musser*

## CIOCCOLATO

### La svolta decisiva per la sua popolarità fu l'abbinamento con il latte

Il cioccolato era una bevanda amata dai Maya, dagli Aztechi e da altri popoli mesoamericani molto tempo prima che gli spagnoli lo «scoprissero» e lo portassero in Europa. Secondo le testimonianze archeologiche, l'uomo consuma cioccolato da almeno 3100 anni, e non soltanto come alimento: i Maya e altre culture precolombiane offrivano baccelli di cacao agli dèi nell'ambito di molti rituali diversi, tra cui quelli che prevedevano un sacrificio umano.

Ma fu un protestante irlandese ad avere l'idea che rappresentò la svolta forse decisiva nella storia del cioccolato. Intorno al 1680 Hans Sloane, il medico e naturalista la cui vasta collezione di libri ed esemplari naturali fu il nucleo di partenza del British Museum, lavorava alle dipendenze del governatore britannico della Giamaica con il compito di raccogliere manufatti e di classificare piante e animali indigeni. Sloane si rese conto che la bevanda locale a base di cioccolato amaro diventava molto più godibile quando la mescolava con il latte. In seguito brevettò la sua invenzione; anche se molti avevano imparato ad apprezzare il cioccolato fatto con l'acqua calda, la versione di Sloane divenne presto popolare in Inghilterra e in tutta Europa. Il latte fu poi aggiunto anche alla versione solida, e oggi circa due persone su tre dicono di preferire il cioccolato al latte a quello fondente.

Gli effetti positivi del cioccolato sulla salute sono ormai ben documentati. Antiossidanti come i polifenoli e i flavonoidi costituiscono circa l'8 per cento del peso del seme di cacao secco. Gli antiossidanti neutralizzano le molecole fortemente reattive chiamate radicali liberi che altrimenti danneggerebbero le cellule. E non è un caso che il cacao (e altre piante ricche di antiossidanti come il caffè e il tè) cresca spontaneamente a basse latitudini, poiché i vegetali che contengono alti livelli di antiossidanti tendono a crescere in luoghi vicini all'equatore. La radiazione ultravioletta del Sole scompone le molecole biologiche in radicali liberi, e queste piante probabilmente producono antiossidanti per sopportare meglio lo stress. Benché un consumo esagerato di cioccolato possa tradursi in un accumulo eccessivo di calorie, studi sugli animali e sull'uomo hanno mostrato che una sua assunzione moderata può avere effetti positivi sulla pressione sanguigna, rallentare l'aterosclerosi e abbassare il colesterolo «cattivo». Il cioccolato fa bene anche alla mente: un recente studio norvegese ha evidenziato che gli anziani che consumano cioccolato, vino o tè, tutti alimenti ricchi di flavonoidi, ottengono risultati migliori nei test cognitivi.

*Davide Castelvecchi*

# L'UNIVERSO

di Michael S. Turner

ORIGINI

**Gli scienziati si stanno avvicinando a spiegare i processi che generarono il cosmo e lo portarono ad assumere la forma attuale**

L'universo è grande sia nello spazio sia nel tempo, e per buona parte della storia dell'umanità è rimasto fuori della portata dei nostri strumenti e delle nostre menti. Questo stato di cose è completamente cambiato nel XX secolo. I progressi si sono avuti sia grazie a idee potenti – dalla relatività generale di Einstein alle teorie sulle particelle elementari – sia grazie a strumenti potenti, dai telescopi a riflessione da 2,5 e da 5 metri costruiti da George Ellery Hale, che hanno permesso di gettare lo sguardo al di fuori della nostra galassia, la Via Lattea, al telescopio spaziale Hubble, che ci ha portato al momento della nascita delle galassie. Nel corso degli ultimi vent'anni l'incedere della conoscenza è accelerato con la conferma del fatto che la materia oscura non è composta da atomi «ordinari», con la scoperta dell'energia oscura e con la comparsa di idee ardite quali l'inflazione cosmica e il multiverso.

L'universo di cent'anni fa era semplice: eterno, immutabile, composto da un'unica galassia che conteneva qualche milione di stelle visibili. Il quadro odierno è più completo e molto più ricco. Il cosmo ha avuto inizio 13,7 miliardi di anni fa, con il big bang. Una frazione di secondo dopo l'inizio l'universo era un brodo caldo e informe composto dalle particelle più elementari, quark e leptoni. Via via che si espandeva e si raffreddava si sviluppavano livelli successivi di struttura: neutroni e protoni, nuclei atomici, atomi, stelle, galassie, ammassi di galassie e infine superammassi. Oggi la parte osservabile dell'universo è popolata da 100 miliardi di galassie, ognuna contenente 100 miliardi di stelle e probabilmente un numero simile di pianeti. Le galassie stesse sono tenute insieme dalla gravità della misteriosa materia oscura. L'universo continua a espandersi, e questo avviene a una velocità che aumenta a causa dell'energia oscura, una forma di energia ancora più misteriosa, la cui forza di gravità respinge anziché attrarre.

Il tema generale nella storia del nostro universo è l'evoluzione dalla semplicità del brodo di quark alla complessità che vediamo attualmente nelle galassie, nelle stelle, nei pianeti e nella vita. Queste caratteristiche emersero una dopo l'altra nel corso di miliardi di anni, guidate dalle leggi fondamentali della fisica. Nel loro percorso verso l'origine della creazione, i cosmologi inizialmente viaggiano attraverso la storia ben conosciuta dell'universo fino al primo microsecondo; in seguito fino a $10^{-43}$ secondi dall'origine, un momento su cui le idee sono ben sviluppate ma le prove non sono ancora solide; e infine viaggiano fino ai primi istanti della creazione, su cui le nostre idee sono ancora puramente ipotetiche. Anche se l'origine assoluta dell'universo si trova ancora al di là della nostra portata, abbiamo congetture affascinanti, tra cui il concetto di multiverso, secondo cui l'universo comprende un numero infinito di sottouniversi sconnessi.

## IN SINTESI

- Il nostro universo ebbe inizio con un big bang 13,7 miliardi di anni fa e da allora si è espanso e raffreddato. Si è evoluto da un brodo informe di particelle elementari fino a diventare il cosmo strutturato di oggi.
- Durante il primo microsecondo la materia prevalse sull'antimateria, comparvero i nuclei alla base delle galassie e si creò la materia oscura (la materia non identificata che tiene insieme le strutture).
- Il futuro dell'universo è nelle mani dell'energia oscura, una forma sconosciuta di energia che qualche miliardo di anni fa permise all'espansione cosmica di iniziare ad accelerare.

Holly Lindem (*fotoillustrazione*); Gene Burkhardt (*styling*)

**L'AUTORE**

**MICHAEL S. TURNER** è stato pioniere dell'unione interdisciplinare tra fisica delle particelle, astrofisica e cosmologia, e ha diretto lo studio della National Academy che, all'inizio di questo decennio, ha elaborato le prospettive di questo nuovo campo. È professore al Kavli Institute for Cosmological Physics dell'Università di Chicago. Dal 2003 al 2006 è stato a capo della Direzione per le scienze matematiche e fisiche della National Science Foundation. Tra i suoi riconoscimenti figurano il Warner Prize dell'American Astronomical Society, il Lilienfeld Prize dell'American Physical Society e il Klopsted Award dell'American Association of Physics Teachers.

## Universo in espansione

Nel 1924, usando il telescopio Hooker da 2,5 metri di Mount Wilson, Edwin Hubble mostrò che le indistinte nebulose, oggetto di studio e di congetture da vari secoli, erano galassie come la nostra, e ingrandì di 100 miliardi di volte l'universo conosciuto. Qualche anno dopo mostrò che le galassie si allontanano l'una dall'altra in un modo regolare descritto da una relazione matematica oggi nota come legge di Hubble, secondo cui le galassie più lontane si muovono più velocemente. È la legge di Hubble, applicata al passato, che indica un big bang 13,7 miliardi di anni fa.

La legge di Hubble trovò un'interpretazione naturale all'interno della relatività generale: lo spazio stesso si espande, e le galassie vi vengono trascinate (*si veda il box in questa pagina*). Anche la luce viene deformata, cioè spostata verso il rosso: è un fenomeno che toglie energia, e quindi l'universo si raffredda via via che si espande. L'espansione cosmica fornisce il contesto per capire come si arrivò all'universo odierno. Quando i cosmologi immaginano di riportare indietro le lancette, l'universo diventa più denso, più caldo, più estremo e più semplice. Esplorando gli inizi sondiamo anche i meccanismi della natura aiutandoci con un acceleratore più potente rispetto a quelli costruiti sulla Terra: il big bang stesso.

Osservando lo spazio con i telescopi gli astronomi scrutano il passato, e più è grande il telescopio più indietro nel tempo possono scrutare. La luce proveniente dalle galassie lontane rivela un'era passata, e la misura dello spostamento verso il rosso subito da questa luce indica di quanto sia cresciuto l'universo negli anni intermedi.

L'attuale primatista ha uno spostamento verso il rosso di circa 8, che rappresenta un momento in cui l'universo aveva un nono delle dimensioni attuali e aveva solo qualche centinaio di milioni di anni. Telescopi come l'Hubble Space Telescope e i telescopi Keck da dieci metri sul Mauna Kea ci riportano facilmente al momento in cui si stavano formando le galassie come la nostra, qualche miliardo di anni dopo il big bang. La luce da epoche ancora precedenti è tanto spostata verso il rosso che gli astronomi devono cercarla nell'infrarosso e tra le onde radio. I telescopi del futuro – come il James Webb Space Telescope, un telescopio per l'infrarosso da 6,5 metri, e l'Atacama Large Millimeter Array (ALMA), una rete di 64 parabole radio nel Cile settentrionale – ci porteranno al momento della nascita delle primissime stelle e galassie.

**Espansione cosmica**

L'evoluzione dell'universo è guidata dall'espansione dello spazio. Al dilatarsi dello spazio, come la gomma di un palloncino mentre viene gonfiato, le galassie si allontanano e le onde luminose si allungano (e quindi si spostano verso il rosso).

Le simulazioni al computer dicono che quelle stelle e galassie si formarono quando l'universo aveva circa 100 milioni di anni. Prima di allora l'universo attraversò un periodo detto «età oscura», in cui era quasi completamente buio. Lo spazio era pieno di un brodo informe, composto da cinque parti di materia oscura e una parte di idrogeno ed elio, che si diluì via via che l'universo si espandeva. La materia aveva una densità leggermente disomogenea, e la gravità amplificò queste variazioni di densità: le regioni più dense si espandevano più lentamente di quelle meno dense. Arrivati a 100 milioni di anni, le regioni più dense non solo si espandevano più lentamente, ma cominciarono addirittura a subire un collasso. Queste regioni contenevano, ciascuna, materiale pari a circa un milione di volte la massa del Sole. Furono i primi oggetti del cosmo tenuti insieme dalla gravità.

La materia oscura formava il grosso della loro massa ma, come suggerisce il nome, non emetteva o assorbiva luce e così rimase sotto forma di una nube diffusa. L'idrogeno e l'elio, invece, emettevano luce, perdevano energia e si concentravano al centro della nube, che alla fine collassava fino a generare le stelle. Queste prime stelle avevano una massa molto maggiore rispetto a quelle di oggi: centinaia di masse solari. E avevano vite molto brevi prima di esplodere e lasciarsi dietro i primi elementi pesanti. Nel corso del miliardo di anni successivo la forza di gravità aggregò nelle prime galassie queste nubi da un milione di masse solari.

Dovrebbe essere possibile individuare la radiazione dalle nubi primordiali di idrogeno, fortemente spostata verso il rosso a causa dell'espansione, usando schiere di antenne radio con un'area di ricezione complessiva che raggiunge un chilometro quadrato. Quando saranno costruite, queste schiere osserveranno come la prima generazione di stelle e galassie ionizzò l'idrogeno, mettendo fine all'età oscura (si veda *L'età oscura dell'universo*, di Abraham Loeb, in «Le Scienze» n. 461, gennaio 2007).

## Flebile bagliore di un inizio incandescente

Dopo l'età oscura c'è la luminosità del caldo big bang, con uno spostamento verso il rosso di 1100. Questa radiazione fu spostata dalla luce visibile (una luce rosso-arancione) oltre l'infrarosso, fino alle microonde. Quello che vediamo di quell'epoca è un muro di radiazioni nella frequenza delle microonde che riempie il cielo, la radiazione cosmica di fondo a microonde (*cosmic microwave background radiation*, CMB), scoperta nel 1964 da Arno Penzias e Robert Wilson. Ci permette di gettare uno sguardo sull'universo alla tenera età di 380.000 anni, il periodo in cui si formarono gli atomi. Prima di allora l'universo era un brodo quasi uniforme di nuclei atomici, elettroni e fotoni. Quando si raffreddò a circa 3000 kelvin, i nuclei e gli elettroni si unirono a formare atomi. I fotoni cessarono di essere deflessi dagli elettroni e sfrecciarono senza ostacoli per lo spazio, rivelando l'universo di un tempo più semplice, prima dell'esistenza di stelle e galassie.

Nel 1992 il satellite Cosmic Background Explorer della NASA scoprì che l'intensità della CMB ha lievi variazioni, dello 0,001 per cento circa, che riflettono piccole increspature nella distribuzione della materia. Le increspature primordiali avevano le dimensioni giuste per essere i semi di galassie e strutture più grandi che si sarebbero formate per effetto della gravità. La disposizione nel cielo di queste variazioni della radiazione di fondo descrive anche alcune proprietà fondamentali dell'universo, come la sua densità e composizione complessiva, nonché indizi sui suoi primi istanti; lo studio attento di queste variazioni ha rivelato molto sull'universo (*si veda la figura in basso a p. 53*).

Proiettando a ritroso un film dell'evoluzione dell'universo prima di questo punto, vediamo il plasma primordiale diventare sempre più caldo e denso. Prima di circa 100.000 anni la densità di energia della radiazione superava quella della materia, impedendo alla materia di aggregarsi. Quindi questo momento indica l'inizio della formazione gravitazionale di tutte le strutture che vediamo

**Prima del big bang**

I cosmologi non sanno ancora come cominciò l'universo. Il big bang potrebbe essere il vero inizio o semplicemente una violenta transizione da uno stato preesistente. Ecco quattro scenari.

**A Nessuna epoca precedente**
Materia, energia, spazio e tempo iniziano violentemente con il big bang.

**B Nascita quantistica**
Spazio e tempo ordinari si sviluppano da uno stato primordiale descritto da una teoria quantistica della gravità.

**C Multiverso**
Il nostro e altri universi nascono da uno spazio eterno.

**D Universo ciclico**
Il big bang è l'ultimo passaggio di un ciclo eterno di espansione, collasso e nuova espansione.

**$10^{-43}$ secondi**
L'era di Planck: primo intervallo di tempo dotato di significato; lo spazio e il tempo prendono forma.

(dal ciclo percedente)

IL CAMPO ULTRAPROFONDO DI HUBBLE, l'immagine del cosmo con la maggior definizione mai ottenuta, mostra più di 1000 galassie al momento della loro formazione.

Cortesia Argonne National Laboratory (*Turner*); Melissa Thomas (*illustrazione*)

R. Thompson, Università dell'Arizona, NASA e ESA (*Hubble Ultra Deep Field*); Melissa Thomas (*illustrazione*)

La cronologia del cosmo è scandita da eventi ben compresi che arrivano fino ai nostri giorni.

**Primi istanti dopo il big bang → Formazione degli atomi → Età oscura → Epoca moderna**

**$10^{-35}$ secondi** L'inflazione cosmica ingrandisce lo spazio e lo riempie di un brodo quasi uniforme di particelle.

**$10^{-30}$ secondi** Viene sintetizzato un possibile tipo di materia oscura (gli assioni).

**$10^{-11}$ secondi** La materia prevale sull'antimateria.

**$10^{-10}$ secondi** Viene sintetizzato un secondo tipo di materia oscura (i neutralini).

**$10^{-5}$ secondi** Dai quark si formano protoni e neutroni.

**0,01-300 secondi** Da protoni e neutroni si formano elio, litio e nuclei di idrogeno pesante.

**380.000 anni** Dai nuclei e dagli elettroni si formano gli atomi, e viene emessa la radiazione cosmica di fondo a microonde.

**380.000-300 milioni di anni** La gravità amplifica le differenze di densità nel gas che riempie lo spazio.

**300 milioni di anni** Si formano le prime stelle e galassie.

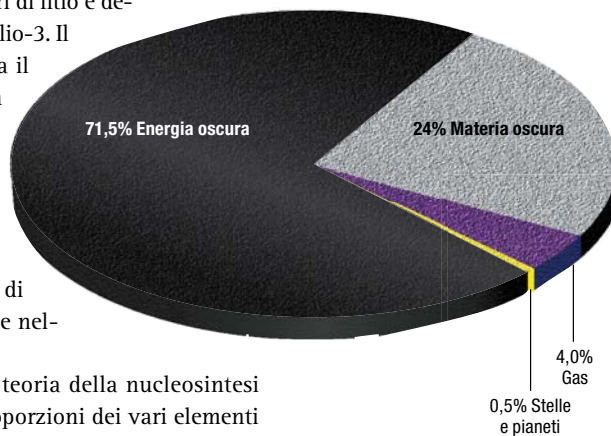
**1 miliardo di anni** Limite delle osservazioni attuali (oggetti con il massimo spostamento verso il rosso).

**3 miliardi di anni** Si creano ammassi di galassie, e la formazione di stelle raggiunge il valore massimo.

**9 miliardi di anni** Si forma il sistema solare.

**10 miliardi di anni** L'energia oscura inizia a far sentire la sua azione, l'espansione inizia ad accelerare.

**13,7 miliardi di anni** Oggi.

oggi nell'universo. Più indietro, quando l'universo aveva meno di un secondo, i nuclei atomici dovevano ancora formarsi; esistevano solo le loro particelle costituenti, cioè elettroni e protoni. I nuclei comparvero quando l'universo aveva un'età di alcuni secondi e temperature e densità erano quelle giuste per le reazioni nucleari. Questo fenomeno di nucleosintesi del big bang produsse solo gli elementi più leggeri della tavola periodica: molto elio (in massa, circa il 25 per cento degli atomi dell'universo) e quantità minori di litio e degli isotopi deuterio ed elio-3. Il resto del plasma (circa il 75 per cento) rimase in forma di protoni, che sarebbero poi diventati atomi di idrogeno. Gli altri elementi della tavola periodica si formarono miliardi di anni dopo nelle stelle e nelle esplosioni stellari.

Le previsioni della teoria della nucleosintesi concordano con le proporzioni dei vari elementi misurate nei più antichi campioni di universo: le stelle più vecchie e le nubi di gas con elevato spostamento verso il rosso. La proporzione di deuterio, molto sensibile alla densità di atomi nell'universo, ha un ruolo speciale: il valore misurato implica che la materia ordinaria ammonta al $4{,}5 \pm 0{,}1$ per cento della densità di energia totale. (Il resto è materia oscura ed energia oscura.) La stima concorda esattamente con la composizione estrapolata analizzando la radiazione di fondo. E questa corrispondenza è un grande successo. Che queste due misurazioni molto diverse, una basata sulla fisica nucleare quando l'universo aveva un secondo e l'altra basata sulla fisica atomica quando l'universo aveva 380.000 anni, concordino è una conferma non solo del nostro modello di come si evolse l'universo ma di tutta la fisica.

71,5% Energia oscura
24% Materia oscura
4,0% Gas
0,5% Stelle e pianeti

IL GROSSO DELL'UNIVERSO è composto da energia oscura e materia oscura, entrambe ancora non identificate. La materia ordinaria di cui sono fatte le stelle, i pianeti e il gas interstellare costituisce solo una piccola percentuale.

## Risposte nel brodo di quark

Prima di un microsecondo non potevano esistere neppure i protoni e i neutroni, e l'universo era un brodo composto dai componenti fondamentali della natura: i quark, i leptoni e i portatori delle forze (fotoni, bosoni W e Z e gluoni). Siamo ragionevolmente sicuri dell'esistenza del brodo di quark perché gli esperimenti con gli acceleratori hanno ricreato, oggi sulla Terra, condizioni simili (si veda *I primi tre microsecondi*, di Michael Riordan e William A. Zajc, in «Le Scienze» n. 455, luglio 2006).

Per esplorare questo periodo i cosmologi non usano telescopi più grandi e migliori, ma potenti idee della fisica delle particelle. Trent'anni fa, lo sviluppo del modello standard della fisica delle particelle ha portato a congetture ardite su come siano unificate le forze e particelle fondamentali apparentemente divise, tra cui la teoria delle stringhe. Ne è emerso che queste nuove idee hanno conseguenze per la cosmologia che sono importanti come l'idea originale del big bang caldo. Suggeriscono collegamenti profondi e inaspettati tra il mondo dell'infinitamente grande e quello dell'infinitamente piccolo. Cominciano a emergere le risposte a tre domande chiave: natura della materia oscura, asimmetria tra materia e antimateria e origine del brodo increspato di quark.

Ora sembra che l'inizio della fase del brodo di quark fosse la culla della materia oscura. L'identità della materia oscura è ancora poco chiara, ma la sua esistenza è ormai accertata. La nostra e tutte le altre galassie, nonché gli ammassi di galassie, sono tenuti insieme dalla gravità dell'invisibile materia oscura. Qualunque cosa essa sia, deve interagire debolmente con la materia ordinaria, altrimenti si sarebbe manifestata in altri modi. I tentativi di trovare un quadro unificatore per le forze e le particelle della natura hanno portato a prevedere particelle stabili o dotate di vita lunga che potrebbero esserne i costituenti. Queste particelle sarebbero presenti oggi come resti della fase del brodo di quark e si pensa che interagiscano molto debolmente con gli atomi.

Melissa Thomas (*illustrazioni*)

Max Tegmark e Angelica de Olivera-Costa (*radiazione cosmica di fondo*)

Un candidato è chiamato neutralino, la più leggera di una nuova, ipotetica classe di particelle che sono le controparti più pesanti delle particelle conosciute. Si ritiene che il neutralino abbia una massa tra 100 e 1000 volte quella del protone, appena all'interno della portata degli esperimenti che saranno condotti al CERN con LHC. I fisici hanno costruito anche rivelatori sotterranei ultrasensibili, varianti per satelliti e palloni per cercare questa particella o i sottoprodotti delle sue interazioni.

Un secondo candidato è l'assione, particella superleggera dotata di massa 1000 miliardi di volte inferiore a quella dell'elettrone. La sua esistenza è suggerita da alcune previsioni del modello standard a proposito del comportamento dei quark. I tentativi di individuarla sfruttano il fatto che in un campo magnetico molto forte un assione si può trasformare in un fotone. Neutralini e assioni hanno la proprietà importante di essere, in un senso tecnico specifico, «freddi». Anche se si formarono in condizioni ribollenti, si muovevano lentamente, aggregandosi facilmente a formare galassie.

La prima fase del brodo di quark racchiude probabilmente anche il segreto del perché oggi l'universo contenga per lo più materia anziché materia e antimateria. I fisici pensano che in origine l'universo contenesse uguali quantità di entrambe ma a un certo punto abbia sviluppato un lieve eccesso di materia: circa un quark in più per ogni miliardo di antiquark. Questo sbilanciamento permise a un numero sufficiente di quark di sopravvivere all'annichilazione con gli antiquark mentre l'universo si espandeva e si raffreddava. Più di quarant'anni fa, esperimenti con gli acceleratori hanno rivelato che le leggi della fisica sono leggermente sbilanciate a favore della materia, e in una serie di interazioni tra particelle avvenute molto presto, che devono ancora essere capite, questo leggero vantaggio portò alla creazione della sovrabbondanza di quark.

Si ritiene che il brodo di quark sia comparso presto, forse $10^{-34}$ secondi dopo il big bang, in uno scatto di espansione cosmica noto come inflazione. Questo scatto, alimentato dall'energia di un nuovo campo (analogo al campo elettromagnetico) chiamato inflatone, spiegherebbe alcune proprietà del cosmo, come la sua complessiva omogeneità e le increspature da cui nacquero galassie e altre strutture dell'universo. Via via che l'inflatone decadeva, rilasciava energia sotto forma di quark e altre particelle, creando il calore del big bang e il brodo di quark stesso.

L'inflazione porta a un nesso profondo tra quark e cosmo: le fluttuazioni quantistiche nel campo inflatone a scala subatomica si dilatano fino a dimensioni astrofisiche per via della rapida espansione, e diventano basi per le strutture che vediamo. In altre parole, la configurazione della CMB che si vede nel cielo è un'immagine gigantesca del mondo subatomico. Le osservazioni della CMB concordano con questa previsione, fornendo la prova più forte del fatto che nei primi istanti del cosmo si verificò l'inflazione o qualcosa di simile.

LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO a microonde è un'istantanea dell'universo alla tenera età di 380.000 anni. Le minuscole variazioni nell'intensità della radiazione (identificate qui dai vari colori) costituiscono un stele di Rosetta cosmica che rivela alcune proprietà fondamentali dell'universo, tra cui la sua età, la sua densità, la sua geometria e la sua composizione complessiva.

## Nascita dell'universo

Via via che i cosmologi cercano di andare ancora oltre nella comprensione degli inizi dell'universo, le idee diventano meno solide. La relativi-

Melissa Thomas

tà generale di Einstein ha posto la base teorica per un secolo di progresso nella nostra comprensione dell'evoluzione dell'universo. Ma non è compatibile con un altro pilastro della fisica, la meccanica quantistica, e il più importante compito della fisica di oggi consiste nel riconciliarle. Solo con una teoria unificata saremo in grado di svelare i primissimi istanti dell'universo – la cosiddetta era di Planck, precedente un'età di circa $10^{-43}$ secondi – quando stava prendendo forma lo spazio-tempo stesso.

I tentativi di elaborare una teoria unificata hanno portato a ipotesi notevoli riguardo i primi istanti. La teoria delle stringhe, per esempio, prevede l'esistenza di dimensioni aggiuntive dello spazio e la possibilità di altri universi in questo spazio più ampio. Quello che chiamiamo big bang può essere stato la collisione del nostro universo con un altro (si veda *Prima del big bang*, di Gabriele Veneziano, in «Le Scienze» n. 429, maggio 2004). L'unione della teoria delle stringhe con il concetto di inflazione ha portato forse all'idea più ardita emersa finora, quella di un multiverso, cioè che l'universo contenga un numero infinito di parti sconnesse, ognuna con le sue leggi della fisica (si veda *Il paesaggio della teoria delle stringhe*, di Raphael Busso e Joseph Polchinski, in «Le Scienze» n. 435, novembre 2004).

Il concetto di multiverso, che sta ancora muovendo i primi passi, si basa su due fondamentali scoperte teoriche. Primo, le equazioni che descrivono l'inflazione suggeriscono che se l'inflazione è avvenuta una volta dovrebbe avvenire più volte, creando nel corso del tempo un numero infinito di regioni inflazionarie. Nulla può passare dall'una all'altra di queste regioni, e quindi non hanno effetto l'una sull'altra. Secondo, la teoria delle stringhe suggerisce che queste regioni abbiano parametri fisici diversi, come il numero di dimensioni spaziali e i tipi di particelle stabili.

Il concetto di multiverso dà nuove risposte a due delle più controverse domande della scienza: che cosa accadde prima del big bang e perché le leggi della fisica sono come sono (il famoso interrogativo di Einstein su «se Dio avesse possibilità di scelta» sulle leggi). Il multiverso rende irrilevante la domanda su prima del big bang, perché ci fu un numero infinito di inizi con un big bang, ognuno attivato dalla propria inflazione. Analogamente viene accantonata la domanda di Einstein: all'interno di un'infinità di universi sono state provate tutte le possibili leggi fisiche, e quindi non c'è una ragione particolare per le leggi del nostro.

I cosmologi hanno idee contrastanti nei confronti del multiverso. Se i sottouniversi sconnessi non possono comunicare, non possiamo sperare in prove sperimentali della loro esistenza: sembrano al di là del dominio della scienza. D'altro canto il multiverso risolve vari problemi concettuali. Se è corretto, l'allargamento di Hubble delle frontiere dell'universo di un fattore pari a 100 miliardi e l'allontanamento copernicano della Terra dal centro del cosmo nel XVI secolo sembreranno progressi minuscoli nella conoscenza del nostro posto nel cosmo.

## Accelerazione cosmica ed energia oscura

Un elemento centrale della nostra attuale visione dell'universo, e allo stesso tempo il suo più grande mistero, è l'energia oscura, la stranissima forma di energia scoperta di recente che causa un'accelerazione dell'espansione cosmica. L'energia oscura ha preso il controllo sulla materia qualche miliardo di anni fa. Prima di allora l'espansione stava rallentando a causa dell'attrazione gravitazionale esercitata dalla materia, e la gravità era in grado di creare strutture come le galassie e i superammassi. Ora, a causa dell'influenza dell'energia oscura, non si possono formare strutture più grandi dei superammassi. Anzi, se l'energia oscura si fosse imposta prima, per esempio quando l'universo aveva solo 100 milioni di anni, la formazione delle strutture si sarebbe interrotta ancora prima della formazione delle galassie, e noi non ci saremmo.

I cosmologi hanno solo indizi rudimentali sulla natura dell'energia oscura. L'accelerazione dell'espansione richiede una forza repulsiva, e la teoria della relatività generale prevede che la gravità di una forma estremamente elastica di energia possa effettivamente essere repulsiva. L'energia quantistica che riempie lo spazio vuoto agisce in questo modo. Il problema è che le stime teoriche della quantità di energia del vuoto non coincidono con la quantità richiesta dalle osservazioni; anzi, la superano di molti ordini di grandezza. In alternativa, l'accelerazione cosmica potrebbe essere alimentata non da un nuovo tipo di energia, ma da un fenomeno che imita un'energia del genere, forse il venir meno della relatività generale o l'effetto di dimensioni spaziali non osservate (si veda l'articolo *Rompicapo cosmico*, di Lawrence Krauss e Michael Turner, in «Le Scienze» n. 435, novembre 2004).

Se l'universo continua ad accelerare alla velocità attuale, fra 30 miliardi di anni sarà scomparsa ogni traccia del big bang (si veda *La fine della cosmologia?*, di Lawrence Krauss e Robert J. Scherrer, in «Le Scienze» n. 477, maggio 2008). La luce di tutte le galassie, escluse quelle più vicine, sarà troppo spostata verso il rosso per poter essere rilevata, la temperatura della radiazione cosmica di fondo sarà troppo bassa per essere misurabile e l'universo avrà un aspetto simile a quello conosciuto dagli astronomi un secolo fa, prima che i loro strumenti fossero sufficientemente potenti da rivelare l'universo che conosciamo oggi.

SE L'UNIVERSO avesse ancora più energia oscura rispetto a quella che ha, sarebbe rimasto quasi informe (*a sinistra*), senza le strutture macroscopiche che osserviamo (*a destra*).

Liang Gao, Carlos Frenk e Adrian Jenkins, Institute for Computational Cosmology, Università di Durham

La cosmologia moderna ci ha umiliato. Siamo fatti di protoni, neutroni ed elettroni, che compongono solo il 4,5 per cento dell'universo, ed esistiamo solo a causa di sottili collegamenti tra il piccolissimo e l'immenso. Eventi guidati da leggi microscopiche della fisica permisero alla materia di avere la meglio sull'antimateria, generarono le disomogeneità alla base delle galassie, riempirono lo spazio di particelle di materia oscura che fornisceno l'infrastruttura gravitazionale e fecero sì che la materia oscura costruisse le galassie prima che l'energia oscura diventasse significativa e l'espansione cominciasse ad accelerare (*si veda il box in questa pagina*).

Allo stesso tempo la cosmologia è per sua natura arrogante. L'idea di capire qualcosa di vasto nello spazio e nel tempo, come il nostro universo, è irragionevole, a ben vedere. Questa commistione di umiltà e arroganza ci ha portato molto avanti, nell'ultimo secolo, nella conoscenza dell'universo e delle sue origini. Sono molto fiducioso nei progressi negli anni a venire, e credo fermamente che viviamo in un'età dell'oro della cosmologia. ■

## ➡ Letture

**The Early Universe.** Kolb E.W. e Turner M.S., Westview Press, 1994.

**The Inflationary Universe.** Guth A., Basic Books, 1998.

**Quarks and the Cosmos.** Turner M.S., in «Science», Vol. 315, pp. 59-61, 5 gennaio 2007.

**Dark energy and the Accelerating universe.** Frieman J., Turner M.S. e Huterer D., in «Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics», Vol. 46, pp. 385-432, 2008. Disponibile on line all'indirizzo **arxiv.org/abs/0803.0982.**

ORIGINI

# LA VITA SULLA TERRA

di Alonso Ricardo e Jack W. Szostak

## Dagli studi sulla materia inanimata arrivano nuovi indizi sull'origine dei primi organismi

### IN SINTESI

- I ricercatori hanno scoperto una nuova serie di reazioni grazie a cui l'RNA potrebbe essersi formato da composti chimici presenti sulla giovane Terra.
- Altri studi hanno confortato questa ipotesi secondo cui cellule primitive contenenti molecole simili all'RNA potrebbero assemblarsi spontaneamente, riproducendosi ed evolvendosi, e dando infine origine alla vita.
- Ora si sta cercando di produrre in laboratorio i primi organismi completamente autoreplicanti, una nuova origine della vita per capire come ha avuto inizio la prima volta.

Ogni cellula vivente, anche il batterio più semplice, abbonda di congegni molecolari che susciterebbero l'invidia di ogni ricercatore in nanotecnologie. Senza sosta, mentre vibrano, girano o si muovono dentro la cellula, queste macchine tagliano, copiano e incollano molecole genetiche, trasportano i nutrienti o li trasformano in energia, costruiscono e riparano membrane cellulari, trasmettono messaggi meccanici, chimici o elettrici. La lista continua a lungo, e cresce ogni giorno grazie a nuove scoperte.

È praticamente impossibile immaginare in che modo le macchine di una cellula, per la maggior parte catalizzatori a base di proteine chiamati enzimi, si siano formate spontaneamente mentre la vita emergeva dalla materia inanimata circa 3,7 miliardi di anni fa. È vero che nelle giuste condizioni alcuni costituenti delle proteine, gli amminoacidi, si formano facilmente a partire da elementi chimici più semplici, come Stanley L. Miller e Harold C. Urey scoprirono all'Università di Chicago con esperimenti pionieristici negli anni cinquanta. Ma da lì ad arrivare alle proteine e agli enzimi è un'altra cosa.

Il processo di produzione delle proteine cellulari implica che enzimi complessi dividano le due eliche del DNA per estrarre le informazioni contenute nei geni (le istruzioni per costruire le proteine) e tradurle nel prodotto finale. Quindi, spiegare come ha avuto inizio la vita produce un importante paradosso: sembra che ci vogliano proteine, e l'informazione ora immagazzinata nel DNA, per fare le proteine.

D'altro canto, il paradosso scomparirebbe se il primo organismo non avesse avuto bisogno delle proteine. Recenti esperimenti suggeriscono che molecole genetiche simili al DNA o al suo parente stretto, l'RNA, avrebbero potuto formarsi spontaneamente. E poiché queste molecole si ripiegano in diverse forme, o agiscono come rudimentali catalizzatori, potrebbero aver acquisito la capacità di copiare se stesse, cioè di riprodursi, senza bisogno di proteine. Le prime forme di vita potrebbero essere state semplici membrane di acidi grassi – sappiamo che anche queste strutture si formano spontaneamente – che racchiudevano acqua e molecole genetiche autoreplicanti. Il materiale genetico avrebbe codificato i caratteri trasmessi da ogni generazione a quella successiva, proprio come il DNA fa oggi in ogni essere vivente. Mutazioni fortuite, apparse casualmente durante il processo di copiatura, avrebbero poi alimentato l'evoluzione, consentendo a queste «protocellule» di adattarsi al loro ambiente, in competizione l'una con l'altra, modificandosi infine in tutte le forme viventi che conosciamo.

La reale natura dei primi organismi e le esatte circostanze dell'origine della vita potrebbero essere inaccessibili per sempre alla scienza. Ma la ricerca potrebbe almeno aiutarci a capire quello che rientra nel possibile. La sfida finale è la costruzione di

Holly Lindem (*fotoillustrazione*); Gene Burkhardt (*styling*)

un organismo artificiale in grado di riprodursi ed evolvere. Ricreare la vita ci aiuterà certamente a capire come la vita può avere origine, quanto sia probabile che esista in altri mondi e, in definitiva, che cos'è la vita.

## Alla ricerca di un inizio

Uno dei misteri più complicati e interessanti che circondano l'origine della vita sono le esatte modalità con cui il materiale genetico può essersi formato a partire dalle più semplici molecole presenti all'inizio della storia della Terra. In base al ruolo che ha oggi nelle cellule, sembra probabile che l'RNA sia apparso prima del DNA. Quando le cellule sintetizzano le proteine, prima copiano i geni dal DNA all'RNA, e poi usano l'RNA come istruzioni per le proteine. All'inizio, quest'ultimo stadio potrebbe essere esistito indipendentemente. Successivamente il DNA potrebbe essere apparso come forma più durevole di deposito, grazie alla sua maggiore stabilità chimica.

C'è anche un'ulteriore ragione per pensare che l'RNA sia arrivato prima del DNA. Le versioni RNA degli enzimi, i ribozimi, hanno un ruolo centrale nelle cellule. Le strutture che traducono l'RNA nelle proteine sono macchine ibride RNA-proteine, ed è l'RNA al loro interno che compie il lavoro catalitico. Quindi, ognuna delle nostre cellule sembra avere nei suoi ribosomi tracce «fossili» di questo mondo primordiale a RNA.

Molti studi si sono perciò concentrati sulla possibile origine dell'RNA. Le molecole genetiche come DNA e RNA sono polimeri (sequenze di molecole più piccole), composti da nucleotidi. A loro volta i nucleotidi hanno tre diversi componenti: uno zucchero, un fosfato e una base azotata. Le basi azotate sono di quattro tipi, e costituiscono l'alfabeto con cui il polimero codifica l'informazione. In un nucleotide di DNA le basi possono essere A, G, C o T, cioè adenina, guanina, citosina o timina. Nell'RNA la lettera U (uracile) sostituisce la T (*si veda il box in alto*). Le basi sono composti ricchi di azoto che si legano tra loro secondo una semplice regola: A si accoppia con U (o con T), e G si accoppia con C. Queste coppie di basi formano i pioli della scala a chiocciola del DNA, la doppia elica. Il loro accoppiamento esclusivo è cruciale per copiare fedelmente l'informazione, in modo che la cellula si possa riprodurre. Allo stesso tempo, le molecole di fosfato e zucchero formano la spina dorsale di ogni elica di DNA o RNA.

Le basi si possono assemblare spontaneamente, con una serie di passaggi a partire da cianuro, acetilene e acqua: molecole semplici sicuramente presenti nella miscela chimica primordiale. Anche gli zuccheri sono facili da assemblare a partire da semplici materiali di partenza. Da più di un secolo sappiamo che composti di molti tipi di molecole di zucchero si possono ottenere riscaldando una soluzione alcalina di formaldeide, anch'essa forse disponibile sulla giovane Terra. Il problema, tuttavia, è come ottenere il giusto tipo di zucchero, ribosio nel caso dell'RNA, per sintetizzare i nucleotidi. Il ribosio, insieme con tre altri zuccheri simili, si può formare dalla reazione di due zuccheri più semplici che contengono rispettivamente due e tre atomi di carbonio. Tuttavia la capacità del ribosio di formarsi in questo modo non risolve il problema della sua abbondanza ai primordi della Terra, perché il ribosio è instabile e si decompone rapidamente anche in una soluzione poco alcalina. In passato, questa caratteristica ha portato molti scienziati a concludere che la prima molecola genetica non avrebbe potuto contenere ribosio. Diversi ricercatori, tra i quali uno di noi (Ricardo), hanno scoperto alcuni modi in cui si sarebbe potuto stabilizzare il ribosio.

Il fosfato dei nucleotidi presenta un altro problema interessante. Il fosforo, elemento centrale del gruppo fosfato, è abbondante nella crosta terrestre, ma soprattutto in minerali che non si sciolgono rapidamente in acqua, dove probabilmente è nata la vita. Quindi non è affatto ovvio che i fosfati fossero all'interno della miscela prebiotica. Le alte temperature dei camini vulcanici possono convertire minerali che contengono fosfato in forme di fosfato solubile, ma le quantità rilasciate in questo modo, almeno vicino ai vulcani attivi oggi, sono ridotte. Una diversa potenziale fonte di fosfati è la schreibersite, minerale comunemente trovato in alcune meteoriti.

Nel 2005 Matthew Pasek e Dante Lauretta, dell'Università dell'Arizona, hanno scoperto che la corrosione della schreibersite nell'acqua rilascia la sua componente di fosforo. Questo processo sembra promettente, perché libera fosforo in una forma molto più stabile in acqua rispetto al fosfato e molto più reattiva con i composti organici (a base di carbonio).

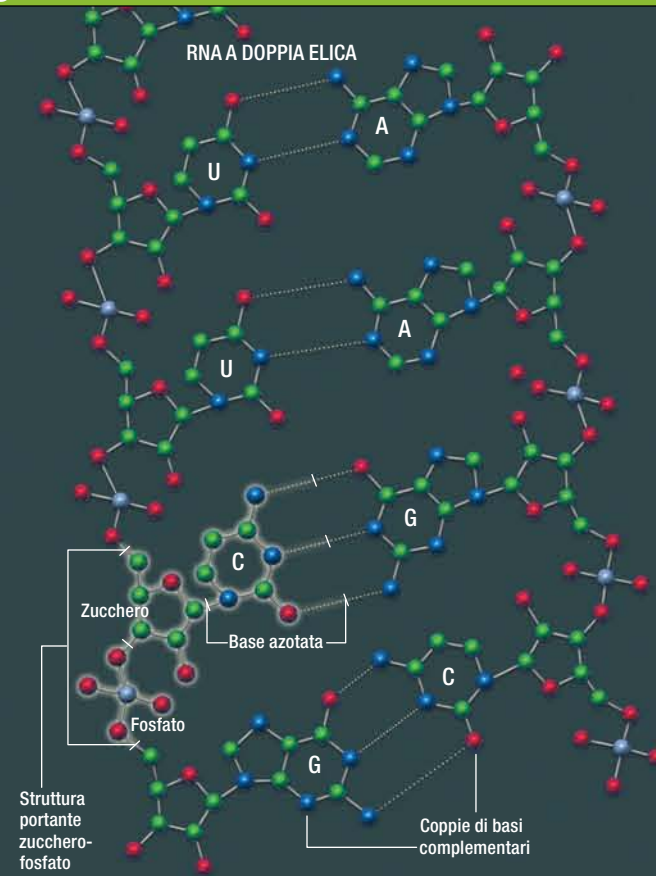
## Assemblaggio necessario

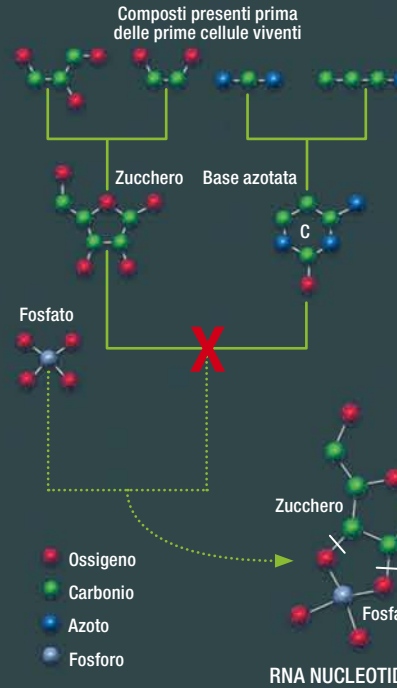
Avendo un'idea dei potenziali processi che portano alle basi nucleotidiche, agli zuccheri e ai fosfati, il passaggio logico successivo è connettere correttamente questi componenti. Ma è proprio questo passaggio che ha causato la più cocente frustrazione degli ultimi decenni. La semplice miscela dei tre componenti in acqua non porta alla formazione spontanea di un nucleotide, soprattutto perché ogni reazione di sintesi implica il rilascio di una molecola d'acqua, cosa che spesso non avviene in una soluzione acquosa. Per la formazione dei legami chimici necessari bisogna fornire energia, per esempio aggiungendo composti energeticamente ricchi che aiutino la reazione. Molti di questi composti potrebbero essere stati presenti agli albori della Terra, ma in laboratorio le reazioni che alimentano si sono rivelate inefficienti, nel migliore dei casi, e molto spesso fallimentari.

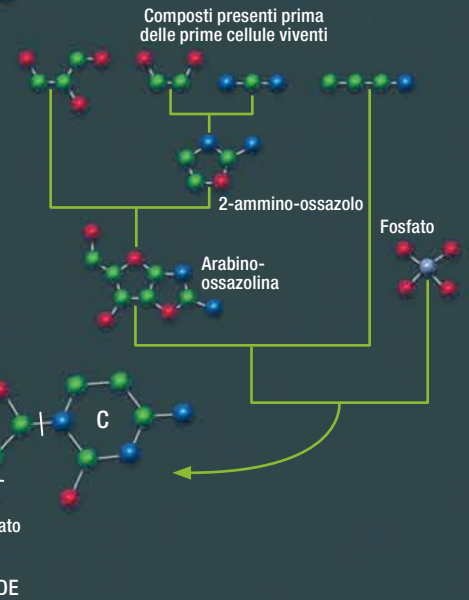
La scorsa primavera, John Sutherland e colleghi dell'Università di Manchester hanno individuato un processo molto più plausibile per la formazione dei nucleotidi, che aggira anche il problema dell'instabilità del ribosio. Questi chimici creativi hanno abbandonato i tentativi di sintesi tradizionale di nucleotidi partendo da una base azotata, zucchero e fosfato. Il loro approccio si basa sugli stessi semplici materiali usati in precedenza, come i derivati del cianuro, l'acetilene e la formaldeide. Però, invece di formare separatamente la base azotata e il ribosio per poi tentare di unirli, hanno mescolato gli ingredienti iniziali, aggiungendo anche il fosfato. Una complessa rete di reazioni, con il fosfato come catalizzatore cruciale in molte fasi del processo, ha prodotto una piccola molecola chiamata 2-ammino-ossazolo, che si può considerare come il frammento di uno zucchero legato a un pezzo di base azotata (*si veda il box in alto*).

Una caratteristica cruciale di questa piccola molecola stabile è la sua grande volatilità. Piccole quantità di 2-ammino-ossazolo potrebbero essersi formate insieme a una miscela di altri composti in una pozza della Terra primordiale. Una volta evaporata l'acqua, il 2-ammino-ossazolo sarebbe vaporizzato per condensarsi altrove in forma purificata, producendo un accumulo pronto per ulteriori reazioni chimiche che avrebbero formato l'unione completa di uno zucchero e di una base azotata.

### Le prime molecole genetiche

Le prime entità sulla Terra capaci di riprodursi ed evolversi probabilmente recavano l'informazione genetica in una molecola simile all'RNA, parente stretto del DNA. Sia DNA che RNA sono catene di unità chiamate nucleotidi (*evidenziate qui a fianco, in basso*), perciò una delle domande fondamentali riguarda l'origine dei nucleotidi a partire da molecole più semplici. I tre componenti di un nucleotide – base azotata, fosfato e zucchero – si possono formare spontaneamente, ma non si legano facilmente nel modo corretto (*al centro*). Esperimenti recenti, tuttavia, hanno mostrato che almeno due tipi di nucleotidi dell'RNA, quelli che contengono le basi U e C, possono essere sintetizzati in modo diverso (*all'estrema destra*). (Negli organismi moderni, le basi dell'RNA sono di quattro tipi: A, C, G e U, che formano le lettere dell'alfabeto genetico.)



**NUCLEOTIDI FALLIMENTARI**
Per lungo tempo i chimici non sono riusciti a trovare un processo in cui le basi, il fosfato e il ribosio (lo zucchero che compone l'RNA) si combinassero spontaneamente a formare i nucleotidi dell'RNA.

**UNA NUOVA STRADA**
In presenza di fosfato, le materie prime per le basi e il ribosio prima formano il 2-ammino-ossazolo, molecola che contiene parte di uno zucchero e parte di una base C o U. Ulteriori reazioni producono una struttura base-ribosio completa, e quindi un nucleotide completo. Le reazioni producono combinazioni «errate» delle molecole originali, ma dopo l'esposizione a radiazione ultravioletta sopravvivono solo le versioni «giuste», cioè i nucleotidi.

Andrew Swift; fonte: *Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions* di Matthew W. Powner, Béatrice Gerland e John D. Sutherland, in «Nature», Vol. 459, 14 maggio 2009

### CHE COS'È LA VITA?

**Gli scienziati hanno discusso a lungo per definire la «vita» in un modo abbastanza ampio da includere forme che ancora non conosciamo. Di seguito alcune delle definizioni proposte.**

1. Il fisico Erwin Schrödinger suggerì che una proprietà che definisce i sistemi viventi è che si autoassemblano, contro la tendenza della natura verso il disordine o entropia.
2. L'ipotesi di lavoro del chimico Gerald Joyce, adottata dalla NASA, è che la vita sia «un sistema chimico che si autosostenta e passibile di evoluzione darwiniana».
3. Nella «definizione cibernetica» di Bernard Korzeniewski, la vita è una rete di meccanismi di retroazione.

Laurent Villeret

**JOHN SUTHERLAND dell'Università di Manchester e i suoi collaboratori hanno risolto nel maggio di quest'anno un problema di vecchia data nel campo della chimica prebiotica, dimostrando che i nucleotidi si possono formare attraverso reazioni chimiche spontanee. Nella foto Sutherland (*il secondo da sinistra*) insieme ai membri del suo laboratorio.**

## ALTERNATIVE AL «MONDO A RNA»

**PRIMA IL PNA**
L'acido peptido-nucleico (PNA) è una molecola con le basi legate a una struttura portante simile a proteine. Visto che il PNA è più semplice e chimicamente più stabile dell'RNA, alcuni studiosi credono che potrebbe essere stato il polimero genetico delle prime forme viventi sulla Terra.

**PRIMA IL METABOLISMO**
Le difficoltà nella spiegazione della formazione dell'RNA dalla materia inanimata hanno portato a teorizzare che la vita abbia avuto inizio come reti di catalizzatori che processavano energia.

**PANSPERMIA**
Poiché «solo» poche centinaia di milioni di anni dividono la formazione del pianeta e l'apparizione della vita, alcuni ricercatori hanno suggerito che i primi organismi sulla Terra potrebbero essere stati ospiti arrivati da altri mondi.


**GLI AUTORI**

ALONSO RICARDO è ricercatore dell'Howard Hughes Medical Institute della Harvard University. Da molto tempo si interessa dell'origine della vita e ora studia i sistemi chimici autoreplicanti.
JACK W. SZOSTAK insegna genetica alla Harvard Medical School e al Massachusetts General Hospital. Il suo interesse nella costruzione di strutture biologiche artificiali per capire gli esseri viventi risale al novembre 1987, quando pubblicò su «Scientific American» un lavoro sui cromosomi artificiali uscito su «Le Scienze» n. 233, gennaio 1988. Il 5 ottobre è stato premiato con il Nobel 2009 per la medicina o la fisiologia.


Un altro aspetto importante di questa catena di reazioni è che alcuni sottoprodotti iniziali facilitano le trasformazioni nelle fasi successive del processo. Ma, per quanto elegante, il processo non genera solo i nucleotidi «corretti»: in alcuni casi lo zucchero e la base azotata non sono disposti in modo giusto nello spazio. L'esposizione alla luce ultravioletta – intensi raggi solari UV colpivano le acque poco profonde della Terra primordiale – distrugge però i nucleotidi «sbagliati» e risparmia quelli «giusti». Il risultato è un percorso che porta ai nucleotidi di C e U. Ovviamente manca ancora un simile percorso che porti a G e A, e quindi ci sono ancora problemi in attesa di risposta. Ma il lavoro del gruppo di Sutherland è un passo molto importante verso la spiegazione del modo in cui una molecola complessa come l'RNA si sia formata sulla Terra primordiale.

## Una piccola, tiepida fiala

Una volta ottenuti i nucleotidi, il passo finale nella formazione di una molecola di RNA è la polimerizzazione: lo zucchero di una molecola forma un legame chimico con il fosfato della successiva, permettendo ai nucleotidi di legarsi a catena. Ancora una volta, in acqua i legami non si formano spontaneamente, e richiedono invece energia dall'esterno. Aggiungendo diversi composti a una soluzione di versioni chimicamente reattive dei nucleotidi, si è riusciti a produrre corte catene di RNA, composte da 2 a 40 nucleotidi. Alla fine degli anni novanta Jim Ferris e colleghi del Rensselaer Polytechnic Institute hanno mostrato che i minerali di argilla amplificano il processo, producendo catene che raggiungono circa 50 nucleotidi. (Un gene va da migliaia a milioni di nucleotidi). L'intrinseca capacità dei minerali di legare i nucleotidi avvicina tra loro molecole reattive, facilitando la formazione di legami (*si veda il box in queste pagine*). La scoperta ha anche corroborato l'ipotesi suggerita da alcuni ricercatori riguardo l'origine della vita su superfici minerali, forse nei fanghi ricchi di argilla presenti sul fondo di pozze d'acqua formate da fonti calde (si veda *Vita dalle rocce*, di Robert M. Hazen, in «Le Scienze» n. 392, aprile 2001).

Certo, capire come i polimeri genetici sono comparsi per la prima volta non risolverebbe il problema dell'origine della vita. Per essere «vivi», gli organismi devono andare oltre, devono moltiplicarsi: un processo che implica la replicazione dell'informazione genetica, un compito che nelle cellule è a carico degli enzimi, composti da proteine.

Ma se i polimeri genetici hanno la giusta sequenza di nucleotidi possono ripiegarsi in forme complesse e catalizzare reazioni, come fanno gli enzimi. Quindi sembra plausibile che nei primi organismi l'RNA abbia diretto la propria replicazione. Questa idea ha ispirato diversi esperimenti nel nostro laboratorio e in quello di David Bartel al Massachusetts Institute of Technology, durante i quali siamo riusciti a far «evolvere» nuovi ribozimi.

Abbiamo iniziato con migliaia di miliardi di sequenze casuali di RNA. Poi abbiamo selezionato quelle con proprietà catalitiche, e ne abbiamo fatto delle copie. In ogni fase di copiatura, alcune nuove eliche di RNA subivano mutazioni che le rendevano catalizzatori più efficienti, e che di nuovo isolavamo per la copiatura successiva. Grazie a questa «evoluzione orientata» abbiamo prodotto ribozimi capaci di catalizzare la copia di sequenze relativamente corte di altri RNA, sebbene non riescano a copiare polimeri con la loro stessa sequenza per formare quindi una progenie di RNA.

Di recente Tracey Lincoln e Gerald Joyce, dello Scripp Research Institute, hanno fornito un'importante sostegno all'ipotesi dell'autoreplicazione dell'RNA, riuscendo a far evolvere due ribozimi di RNA ognuno dei quali può fare copie dell'altro unendo due eliche di RNA più brevi. Purtroppo il successo degli esperimenti dipende dalla presenza di frammenti preesistenti di RNA troppo lunghi e complessi per essersi accumulati spontaneamente. I risultati indicano però che l'RNA ha il potenziale adatto per catalizzare la propria replicazione.

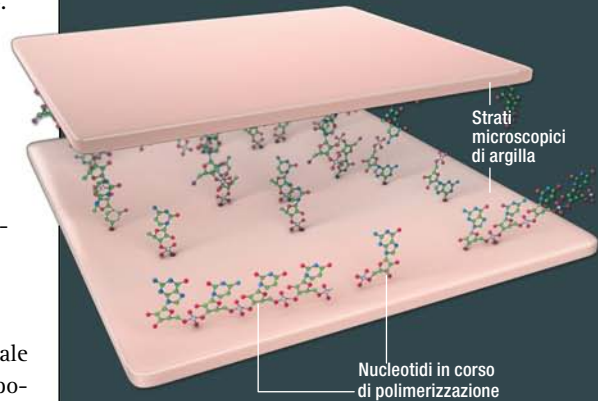
C'è un'alternativa più semplice? Stiamo esplorando nuove strade per copiare le molecole genetiche senza bisogno di catalizzatori. In recenti esperimenti, abbiamo iniziato con singole eliche di DNA «stampo». (Abbiamo lavorato con il DNA perché più facile ed economico, ma potevamo ugualmente usare l'RNA.) Abbiamo mescolato gli stampi in una soluzione contenente nucleotidi isolati, per vedere se i nucleotidi si sarebbero legati agli stampi grazie all'accoppiamento complementare (A unita a T, e C a G) per poi polimerizzare e formare una doppia elica completa. Questo sarebbe stato un primo passo verso una replicazione completa: una volta formata una doppia elica, la separazione delle eliche avrebbe permesso a quelle complementari di funzionare da stampo per copiare l'elica originaria. Con DNA o RNA standard, il processo è troppo lento. Però piccole modifiche alla struttura chimica della componente zuccherina – un gruppo amminico (fatto di azoto e idrogeno) al posto di una coppia ossigeno-idrogeno – aumentano di centinaia di volte la velocità di polimerizzazione, e le eliche complementari si formano nel giro di ore invece di settimane. Il nuovo polimero si comporta in modo molto simile all'RNA classico, nonostante abbia legami azoto-fosforo invece dei normali legami ossigeno-fosforo.

## Una questione di confine

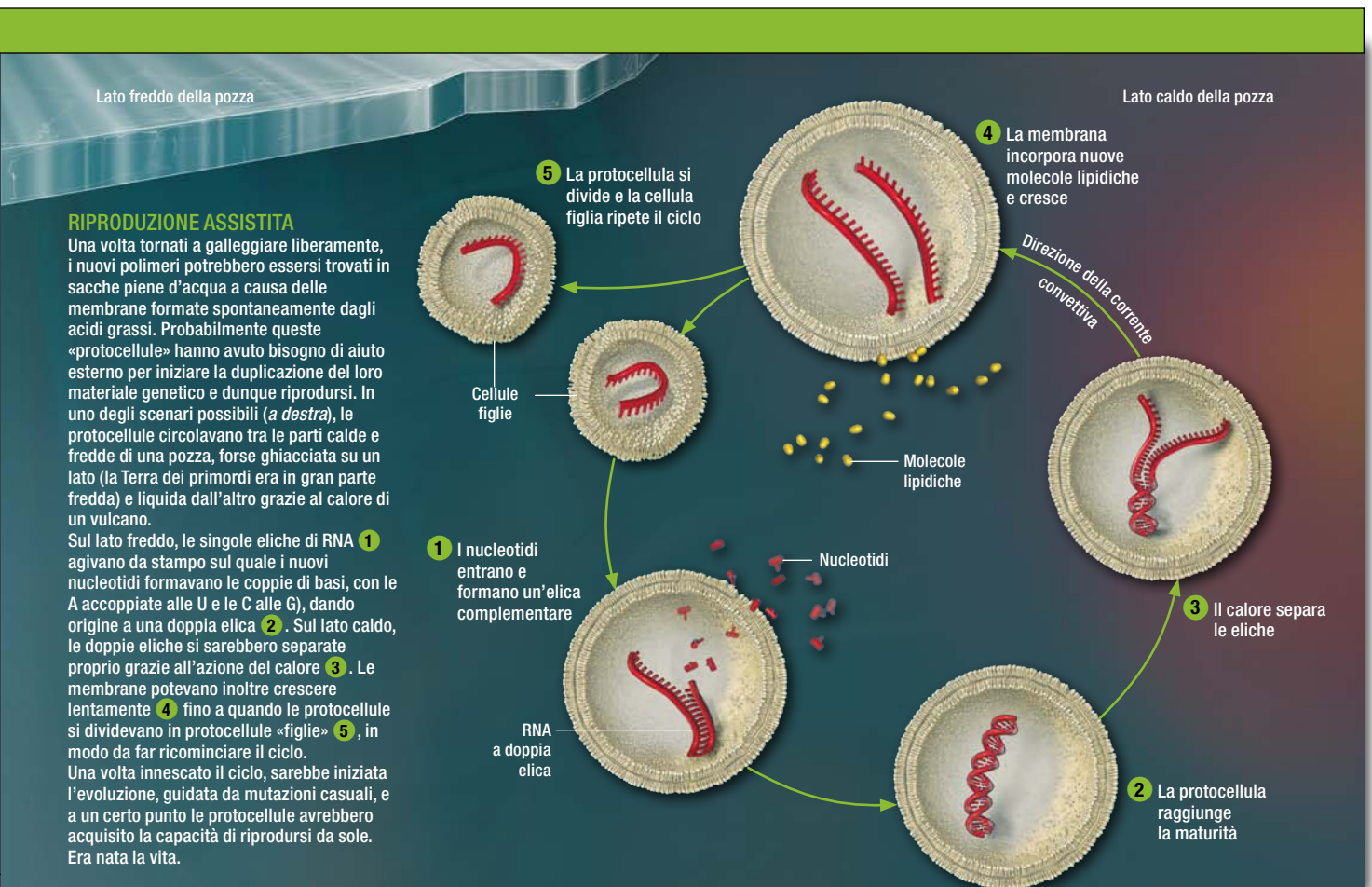
Se ipotizziamo che un giorno saremo in grado di risolvere tutti i problemi chimici relativi all'origine della vita, possiamo iniziare ad analizzare le prime interazioni tra molecole e come le molecole si sono assemblate in strutture primordiali simili alle cellule, o «protocellule».

Le membrane che racchiudono le cellule che osserviamo oggi sono fatte principalmente di uno doppio strato lipidico formato da molecole oleose come fosfolipidi e colesterolo. Le membrane tengono fisicamente insieme i componenti della cellula, e formano una barriera che controlla il passaggio di molecole di grandi dimensioni. Sofisticate proteine inglobate nella membra-

## Verso la vita

Alcune reazioni chimiche hanno creato i primi «mattoni» genetici e altre molecole organiche. In seguito i processi geofisici hanno spostato e concentrato questi mattoni in nuovi ambienti dove i composti si sono assemblati in molecole più complesse e poi in protocellule. Circa 3,7 miliardi di anni fa la geofisica potrebbe aver spinto questi primi precursori delle cellule a riprodursi.

**L'ALLEVAMENTO DI RNA**
Nelle soluzioni acquose in cui si erano formati, i nucleotidi avrebbero avuto poche possibilità di combinarsi in lunghe eliche capaci di immagazzinare l'informazione genetica. Ma nelle giuste condizioni, per esempio trovandosi vicini tra loro in strati di argilla (*sopra*) grazie all'azione di forze di adesione molecolare, i nucleotidi avrebbero potuto unirsi a formare singole eliche simili all'attuale RNA.

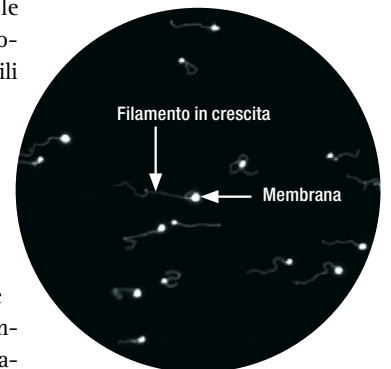
Lato freddo della pozza

Lato caldo della pozza

**RIPRODUZIONE ASSISTITA**
Una volta tornati a galleggiare liberamente, i nuovi polimeri potrebbero essersi trovati in sacche piene d'acqua a causa delle membrane formate spontaneamente dagli acidi grassi. Probabilmente queste «protocellule» hanno avuto bisogno di aiuto esterno per iniziare la duplicazione del loro materiale genetico e dunque riprodursi. In uno degli scenari possibili (*a destra*), le protocellule circolavano tra le parti calde e fredde di una pozza, forse ghiacciata su un lato (la Terra dei primordi era in gran parte fredda) e liquida dall'altro grazie al calore di un vulcano.
Sul lato freddo, le singole eliche di RNA (1) agivano da stampo sul quale i nuovi nucleotidi formavano le coppie di basi, con le A accoppiate alle U e le C alle G), dando origine a una doppia elica (2). Sul lato caldo, le doppie eliche si sarebbero separate proprio grazie all'azione del calore (3). Le membrane potevano inoltre crescere lentamente (4) fino a quando le protocellule si dividevano in protocellule «figlie» (5), in modo da far ricominciare il ciclo.
Una volta innescato il ciclo, sarebbe iniziata l'evoluzione, guidata da mutazioni casuali, e a un certo punto le protocellule avrebbero acquisito la capacità di riprodursi da sole. Era nata la vita.

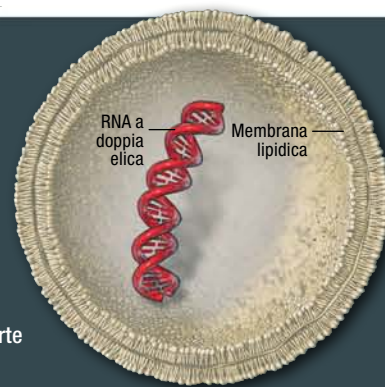
(1) I nucleotidi entrano e formano un'elica complementare
(2) La protocellula raggiunge la maturità
(3) Il calore separa le eliche
(4) La membrana incorpora nuove molecole lipidiche e cresce
(5) La protocellula si divide e la cellula figlia ripete il ciclo
Cellule figlie
Molecole lipidiche
Nucleotidi
RNA a doppia elica
Direzione della corrente convettiva

Cortesia Alonso Ricardo (*Ricardo*); cortesia Jussi Pulkkonen (*Szostak*); Andrew Swift (*illustrazione*)

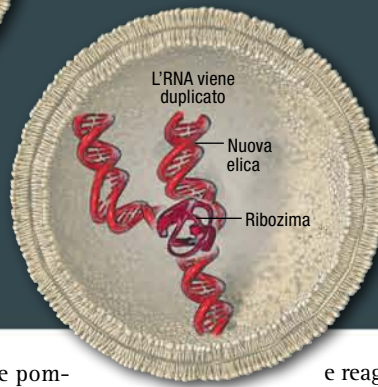
**LE MEMBRANE LIPIDICHE** si autoassemblano a partire da molecole di acidi grassi disciolte in acqua. Le membrane nascono sferiche, e poi formano filamenti assorbendo nuovi acidi grassi (*microfotografia in basso*). Si trasformano in tubi lunghi e sottili e si rompono in molte sfere più piccole. Le prime protocellule potrebbero aver sfruttato questa modalità di divisione.

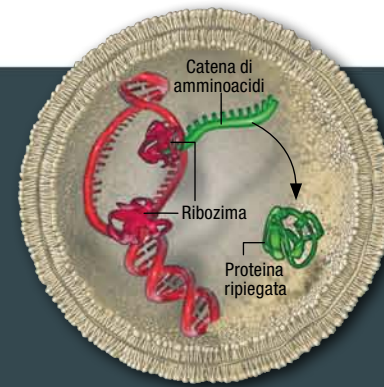
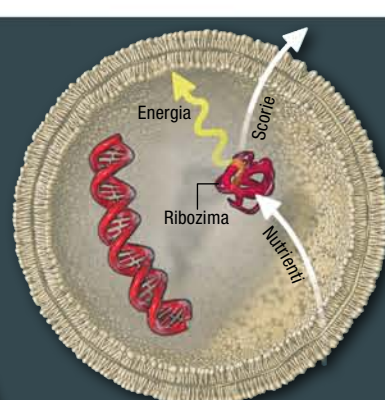
Da *Coupled Growth and Division of Model Protocell Membranes*, di Ting F. Zhu e Jack W. Szostak, in «Journal of the American Chemical Society», Vol. 131, n. 15, 22 aprile 2009

## Viaggio verso la cellula moderna

Dopo l'inizio della vita, la competizione tra le forme viventi ha alimentato la corsa verso organismi sempre più complessi. Potremmo non conoscere mai i dettagli della prima parte dell'evoluzione, tuttavia qui presentiamo una sequenza plausibile di alcuni dei principali eventi che hanno portato dalla prima protocellula alle cellule basate sul DNA, come i batteri.

RNA a doppia elica
Membrana lipidica

**1 INIZIA L'EVOLUZIONE ▲**
La prima protocellula è solo una sacca di acqua e RNA, e richiede uno stimolo esterno (come cicli di caldo e freddo) per riprodursi. Ma presto acquisirà nuove caratteristiche.

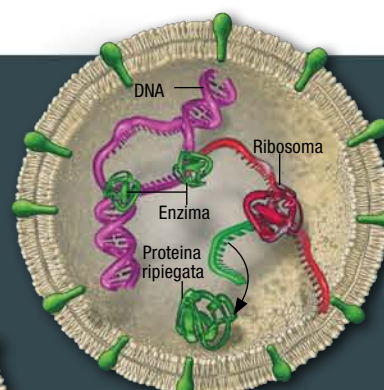
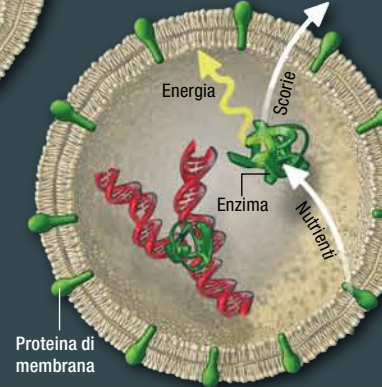
**2 CATALIZZATORI A RNA ▼**
Emergono i ribozimi – molecole di RNA ripiegate, analoghe agli enzimi proteici – e iniziano a compiere specifiche funzioni, come accelerare la riproduzione e rinforzare la membrana della protocellula. Come conseguenza, le protocellule iniziano a riprodursi da sole.

Energia
Scorie
Ribozima
Nutrienti

**3 INIZIA IL METABOLISMO ▲**
Altri ribozimi catalizzano il metabolismo, cioè una catena di reazioni chimiche che consentono alle protocellule di assumere nutrienti dall'ambiente.

Catena di amminoacidi
Ribozima
Proteina ripiegata

**4 COMPAIONO LE PROTEINE ▲**
Complessi sistemi di catalizzatori a RNA traducono sequenze di lettere dell'RNA (geni) in catene di amminoacidi (proteine), che si dimostrano catalizzatori più efficienti, capaci di svolgere diverse funzioni.

**5 LE PROTEINE PRENDONO IL SOPRAVVENTO ▼**
I catalizzatori proteici, o enzimi, sostituiscono gradualmente gran parte dei ribozimi nelle protocellule.

Energia
Scorie
Enzima
Nutrienti
Proteina di membrana

DNA
Ribosoma
Enzima
Proteina ripiegata

**6 NASCITA DEL DNA ▲**
Altri enzimi iniziano a produrre DNA. Grazie alla maggiore stabilità, il DNA sostituisce l'RNA come molecola genetica principale. Il ruolo più rilevante dell'RNA è ora quello di ponte tra DNA e proteine.

**7 IL MONDO DEI BATTERI ▲**
Organismi simili ai moderni batteri si adattano a vivere praticamente ovunque sulla Terra, e dominano indisturbati per miliardi di anni, finché alcuni di essi iniziano a evolversi in organismi più complessi.

## LA VITA, RIVISITATA

Gli scienziati che studiano l'origine della vita sperano di costruire un organismo autoreplicante a partire da ingredienti interamente artificiali. La sfida principale riguarda la scoperta di una molecola genetica capace di copiare se stessa autonomamente. Gli autori di questo articolo e i loro collaboratori stanno progettando e sintetizzando versioni chimicamente modificate di RNA e DNA per scovare questa proprietà elusiva. Probabilmente l'RNA non è la soluzione: la sua doppia elica non si separa facilmente per prepararsi alla replicazione, a meno che non sia molto corta.

na agiscono come guardiani, e pompano le molecole dentro e fuori la cellula, mentre altre proteine aiutano a costruire e riparare la membrana. Come avrebbe potuto una rudimentale protocellula fare tutto ciò senza il macchinario proteico?

Probabilmente le membrane primitive erano composte da molecole più semplici, come gli acidi grassi (uno dei componenti dei più complessi fosfolipidi). Alla fine degli anni settanta era stato dimostrato che in effetti le membrane possono assemblarsi spontaneamente a partire da semplici acidi grassi, ma in generale si pensava che queste membrane fossero una barriera formidabile all'ingresso nella cellula di nucleotidi e altri nutrienti complessi. Questa ipotesi suggeriva che il metabolismo cellulare avrebbe dovuto svilupparsi prima, permettendo alle cellule di sintetizzare i nucleotidi da sole. Tuttavia, nel nostro laboratorio abbiamo dimostrato che se nucleotidi e membrane sono versioni più semplici e «primitive» rispetto alle loro versioni moderne, molecole grandi come nucleotidi attraversano facilmente le membrane.

Questa scoperta ci ha permesso di compiere un semplice esperimento con cui riprodurre la capacità di una protocellula di copiare la propria informazione genetica usando nutrienti presenti nell'ambiente. Abbiamo preparato vescicole con membrane, composte da acidi grassi, che contenevano una breve, singola elica di DNA. Come abbiamo già visto, il DNA sarebbe servito da stampo per una nuova elica. Successivamente abbiamo esposto queste vescicole a versioni reattive dei nucleotidi. I nucleotidi attraversavano spontaneamente la membrana, e una volta entrati nel modello di protocellula si allineavano all'elica di DNA e reagivano generando un'elica complementare. L'esperimento ha quindi sostenuto l'ipotesi per cui le prime protocellule avrebbero contenuto RNA (o qualcosa di simile) e poco altro, e avrebbero replicato il loro materiale genetico senza enzimi.

### Sia fatta la divisione

Per iniziare a riprodursi, le protocellule dovevano crescere, duplicare il loro contenuto genetico e dividersi in cellule «figlie» equivalenti. È stato dimostrato sperimentalmente che vescicole primitive possono crescere in almeno due modi diversi. Con lavori pionieristici negli anni novanta, Pier Luigi Luisi e colleghi del Politecnico federale svizzero (ETH) di Zurigo hanno aggiunto acidi grassi all'acqua in cui erano immerse queste vescicole. Le membrane hanno reagito inglobando gli acidi grassi e hanno aumentato la loro superficie. Con il lento ingresso dell'acqua e delle sostanze disciolte, è aumentato anche il volume delle cellule.

Un secondo metodo, adottato nel nostro laboratorio da Irene Chen, ha coinvolto la competizione tra protocellule. Le protocellule usate come modello e riempite con RNA o molecole simili si gonfiavano per osmosi dovuta al tentativo dell'acqua di entrare nella cellula e avere uguale concentrazione all'interno e all'esterno. Dunque la membrana di queste vescicole rigonfie subiva una tensione, e questa tensione guidava la crescita, visto che l'aggiunta di nuove molecole riduceva la tensione della membrana, abbassando l'energia totale del sistema. In realtà, le vescicole rigonfie crescevano rubando acidi grassi dalle vescicole vicine più rilassate, che invece si restringevano.

L'anno scorso uno studente del nostro laboratorio, Ting Zhu, ha osservato la crescita di protocellule modello dopo averle alimentate con acidi grassi. Con nostro stupore, all'inizio le vescicole sferiche non crescevano semplicemente diventando più grandi, ma formando un sottile filamento. Per circa mezz'ora questo filamento cresceva in spessore e lunghezza, trasformando l'intera vescicola iniziale in un lungo tubo sottile. Questa struttura era piuttosto delicata, e se scossa dolcemente (come potrebbe accadere con un po' di vento che increspi la superficie di una pozza d'acqua) si rompeva in diverse piccole protocellule sferiche, che poi di nuovo aumentavano di dimensione e ripetevano il ciclo (*si veda la microfotografia a p. 61*).

Con gli elementi giusti, la formazione delle protocellule non sembra così difficile: membrane e polimeri genetici si autoassemblano e possono unirsi in diversi modi, per esempio con la formazione di membrane intorno a polimeri preesistenti. Inoltre queste sacche di acqua e RNA possono crescere assorbendo nuove molecole, in competizione per i nutrienti, e quindi dividersi. Ma per diventare viventi dovranno anche riprodursi ed evolversi. In particolare hanno bisogno di separare le proprie doppie eliche di RNA in modo che ogni elica abbia la funzione di stampo per una nuova doppia elica da trasmettere a una cellula figlia.

Questo processo non sarebbe mai potuto iniziare da solo, ma sarebbe bastato un piccolo aiuto. Immaginate, per esempio, una regione vulcanica sulla superficie altrimenti fredda della Terra primordiale (a quel tempo il Sole splendeva solo per il 70 per cento della sua potenza attuale). Potevano esserci pozze di acqua fredda, forse in parte coperte da ghiaccio ma mantenute liquide dalle rocce calde. Le differenze di temperatura creavano correnti convettive che di tanto in tanto esponevano le protocellule presenti nell'acqua a una vampata di calore, passando vicino a rocce calde, ma con il mescolamento di acqua calda e fredda le protocellule si raffreddavano quasi istantaneamente. Il calore improvviso causava la divisione della doppia elica in eliche singole. Tornate nella parte fredda, si formavano nuove doppie eliche, copie dell'originale, grazie alle singole eliche che avrebbero fatto da stampo (*si veda il box a p. 61*).

Una volta che l'ambiente ha aiutato le protocellule a riprodursi, è iniziata la loro l'evoluzione. In particolare, a un certo punto alcune delle sequenze di RNA sarebbero mutate, diventando ribozimi che accelerano la copiatura dell'RNA, con un vantaggio competitivo. Infine i ribozimi avrebbero iniziato a copiare l'RNA senza aiuti esterni.

È relativamente facile immaginare l'evoluzione successiva di protocellule a RNA (*si veda il box in queste pagine*). Il metabolismo sarebbe emerso gradualmente, con nuovi ribozimi che consentivano alle cellule di sintetizzare internamente i nutrienti partendo da materiali più semplici e abbondanti. In seguito gli organismi avrebbero aggiunto la produzione di proteine al loro bagaglio di capacità chimiche.

Con la loro stupefacente versatilità, le proteine avrebbero quindi sostituito l'RNA nella sua funzione di aiuto alla replicazione genetica e al metabolismo. Più tardi gli organismi avrebbero «imparato» a sintetizzare il DNA, godendo del vantaggio conferito da un vettore più robusto per l'informazione genetica. A quel punto, il mondo a RNA sarebbe diventato il mondo a DNA, e sarebbe cominciata la vita come la conosciamo. ■

Andrew Swift

## ➥ Letture

**Synthesizing Life.** Szostak J.W., Bartel D.P. e Luisi P.L., in «Nature», Vol.409, pp.387-390, gennaio 2001.

**Genesis: the Scientific Quest for Life's Origin.** Hazen R.M., Joseph Henry Press, 2005.

**The RNA World.** Gesteland R.F., Cech T. e Atkins J.F. (*a cura*), terza edizione, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2006.

**Le origini della vita.** Shapiro R., in «Le Scienze» n. 468, agosto 2007.

**Una nuova molecola della vita.** Nielsen P.E., in «Le Scienze», n. 487, marzo 2009.

**Exploring Life's Origins.** Progetto multimediale del Museum of Science: **http://exploringorigins.org.**

ORIGINI

# IL SESSO

di Telmo Pievani

## Forse esiste addirittura da due miliardi di anni, ma le ragioni del successo evolutivo della riproduzione sessuale sono ancora incerte

### IN SINTESI

- Il vantaggio evolutivo della riproduzione sessuale non è del tutto chiaro, come aveva fatto già notare Charles Darwin. E in effetti in natura, come si osserva nei microrganismi, nelle piante, in molti invertebrati e in alcuni vertebrati, si ha la possibilità di riproduzione anche senza sesso.
- Il sesso è svantaggioso dal punto di vista dell'individuo. Chi adotta la riproduzione sessuale trasmette solo la metà del proprio patrimonio genetico alla prole. Inoltre i maschi non aumentano il tasso riproduttivo delle femmine e in alcuni casi si limitano alla fornitura di sperma.
- Secondo recenti ipotesi, però, la riproduzione sessuale esiste da due miliardi di anni. E avrebbe il vantaggio di produrre la diversità genetica che manca a una popolazione di cloni, vulnerabile agli attacchi dei patogeni, di aiutare l'accumulazione di mutazioni positive e di proteggere dalle mutazioni dannose.

È faticoso e complicato, ma piace a tutti. Può costarti la vita se lo fai, ma se non lo fai i tuoi geni sono spacciati comunque. Ci sarebbero soluzioni più economiche, eppure tantissime specie vi ricorrono per sfidare l'estinzione. Come si fa è noto, ma perché abbiamo iniziato a farlo lo è molto meno. Senza, non ci sarebbero alcune delle più colorate e commoventi espressioni della natura. Nel 1862 Darwin ammise che le ragioni della sua evoluzione erano ancora avvolte nella più totale oscurità. È il sesso, l'invenzione evoluzionistica forse più ingegnosa ed elusiva di tutti i tempi.

La riproduzione sessuale sfida ancora le nostre conoscenze come un rebus evoluzionistico, ma sono in molti a scommettere che dietro le sue origini si nasconda un messaggio importante su come funziona l'evoluzione nel suo complesso. L'uso stesso del termine «origine» espone a scivolose controindicazioni, perché sembra alludere a un momento fatidico di inizio quando in realtà l'evoluzione è un processo incessante di trasformazione. La storia naturale, poi, spiazza sempre per la sua esuberante eterogeneità di soluzioni. E infatti combinare la metà dei propri geni con un'altra metà proveniente da un individuo dell'altro sesso, per mettere al mondo una prole e moltiplicarsi, non è una strategia univoca.

### Un'abitudine antica e diffusa, ma costosa

Numerose specie alternano il mix genetico di due sessi con la riproduzione asessuale, per esempio femmine che producono uova non fecondate da cui nascono altre femmine. Spiace ammetterlo a chi scrive, ma i maschi diventano piccole parentesi in mezzo a una discendenza di amazzoni che fanno tutto da sole per «partenogenesi». Molte piante rinunciano invece completamente alla riproduzione sessuale e scelgono una propagazione per via vegetativa a partire da gemme e propaggini da cui si staccano discendenti geneticamente identici. Per riprodursi, quindi, un organismo può clonare se stesso, o anche più semplicemente dividersi in due, come fanno batteri e parameci.

Si dà quindi in natura la possibilità di riproduzione senza sesso (nei microrganismi, nelle piante, in molti invertebrati e in alcune decine di vertebrati), ma vale anche il viceversa, come nel «sesso» dei batteri: in molti organismi unicellulari, oltre alla moltiplicazione per divisione, si assiste alla coniugazione fra due individui, cioè a uno scambio di materiale genetico in orizzontale attraverso ponti citoplasmatici.

L'antica sessualità batterica senza riproduzione offre un primo indizio interessante: il risultato del processo è una coppia di individui geneticamente diversi da quelli di partenza. In questo modo essi acquisiscono la potenzialità di adattarsi a condizioni ambientali diverse da quelle iniziali: sembra dunque esserci un legame preciso fra

Andrew Johnson/iStockphoto

## A sessi alterni, seguendo le stagioni

La riproduzione asessuale è comune a tutti gli organismi procarioti ed è prevalente in batteri, protisti e molti funghi e piante. Vi sono inoltre numerosi esempi di specie che si alternano tra riproduzione asessuale e sessuale. La pulce d'acqua (*Daphnia magna*), per esempio, un piccolissimo crostaceo d'acqua dolce, modifica le abitudini riproduttive a seconda delle stagioni: genera femmine per partenogenesi durante la primavera e l'estate, mentre i maschi compaiono solo intorno all'autunno. Da sinistra: pulce d'acqua, batterio *Proteus vulgaris*, idra d'acqua dolce in fase di gemmazione, germoglio di patata.

Martin Oeggerli/SPL/Contrasto (*pulce d'acqua*); Thomas Deerinck, NCMIR/SPL/Contrasto (*batterio*)

Keith Wheeler/SPL/Contrasto (*idra*); Steve Horrell/SPL/Contrasto (*patata*); Peter Scoones/SPL/Contrasto (*squalo e drago di Komodo*)

## SE SERVE, FACCIO DA SOLA

Nei vertebrati la partenogenesi è un fenomeno estremamente raro, ma particolari condizioni ambientali possono spingere occasionalmente alcuni esemplari di una specie ad abbandonare la riproduzione sessuale e preferire un tipo di riproduzione in cui una cellula uovo si sviluppa in embrione, raddoppiando il proprio corredo genetico senza il contributo di DNA paterno. Un caso, per esempio, è stato osservato nel 2001 in una femmina di squalo martello (*sopra*) ospitata in uno zoo del Nebraska: l'analisi del DNA della sua prole ha confermato la completa assenza di materiale genetico maschile. Le stesse condizioni di cattività e isolamento dai maschi sono alla base dei casi di partogenesi in due femmine di drago di Komodo (*in alto*) registrati nel 2006 in uno zoo britannico.


**L'AUTORE**

**TELMO PIEVANI** è professore associato di filosofia della scienza all'Università di Milano-Bicocca, dove è vice direttore del Dipartimento di scienze umane per la formazione. È autore di numerose pubblicazioni, fra cui: *La teoria dell'evoluzione* (Il Mulino, Bologna, 2006) e *In difesa di Darwin* (Bompiani, Milano, 2007). È membro dell'*editorial board* delle riviste «Evolutionary Biology» e «Evolution: Education and Outreach» e direttore di Pikaia, il portale italiano dell'evoluzione.


l'evoluzione del sesso e la produzione di diversità. Se però facciamo il conto di quanti esseri viventi adottano effettivamente la riproduzione sessuale – la totalità di uccelli e mammiferi, per esempio– o ricorrono a essa in talune circostanze, riscontriamo un indubitabile successo globale.

Inoltre, diversamente da quanto sarebbe intuitivo immaginare, non è così sicuro che la sessualità si sia sviluppata tardivamente da una condizione primitiva di asessualità. Anzi, talvolta è il contrario: da scoperte recenti risulta che le specie asessuali sono spesso giovani e a volte portano con sé ancora i geni necessari per la meiosi, come se fossero evoluzioni asessuali in linee originariamente sessuali.

Oggi alcuni scienziati ipotizzano che il sesso abbia avuto inizio addirittura con l'antenato comune di tutti gli eucarioti. Sono state riscontrate tracce nascoste di sessualità nel DNA di organismi che si presumevano da sempre asessuali, segno che forse da tempi antichissimi vi è stata la comparsa di maschi a bassa frequenza o di forme di ricombinazione sessuale. Altre specie invece «prendono in prestito» i maschi da specie affini soltanto per dare inizio allo sviluppo asessuale delle uova. Finora solo i rotiferi bdelloidei (*si veda il box a p. 69*), piccoli invertebrati d'acqua dolce, presentano una storia ininterrotta di partenogenesi pura durata almeno 100 milioni di anni, peraltro con un tasso di diversificazione pari a quello dei loro simili a riproduzione sessuale.

E allora di nuovo il quadro si complica, perché – oltre al poter felicemente fare a meno di maschi per milioni di anni – il sesso è di per sé geneticamente svantaggioso: mentre chi si riproduce asessualmente può trasmettere interamente il proprio patrimonio genetico alla discendenza, chi adotta la riproduzione sessuale può ambire solo alla metà, contenuta nei gameti aploidi dei genitori (George C. Williams lo definì il «costo della meiosi»). Inoltre i maschi non contribuiscono ad aumentare il tasso riproduttivo delle femmine e il loro ruolo si limita talvolta soltanto alla fornitura di sperma per la fecondazione. Il dimezzamento secco del numero di copie di geni trasmissibili e la sopportazione del «doppio costo dei maschi» – come lo definì ironicamente John Maynard Smith – devono per forza essere controbilanciati da un qualche sostanzioso vantaggio evolutivo del sesso, altrimenti non si spiega la sua diffusione a partire da almeno 2 miliardi di anni fa e la sua resistenza. Ma qual è allora questa ricompensa del sesso?

### Il segreto nascosto del sesso

Le ipotesi sul segreto nascosto del sesso si sono succedute per decenni e ancora non si è giunti a un consenso generale, anche se il quadro si va sempre più delineando. Un primo paradosso, quello della presenza di così tanti maschi apparentemente inutili, può essere risolto pensando a come funziona la selezione naturale. Se il maschio è così costoso, e con la moltitudine di spermatozoi che produce potrebbe fecondare miriadi di femmine, perché l'evoluzione non fissa una quantità minima di maschi e il resto tutte femmine? Qualche volta, in effetti, è così: nelle società cooperative di insetti eusociali – imenotteri sociali come api e formiche – le operaie femmine sono tutte sorelle e la presenza di maschi è regolata dal fatto che essi nascono solo da uova non fecondate; nelle specie in cui fra i maschi vige una ferrea competizione per la conquista di sostanziosi harem di femmine, alle madri al di sotto di un certo peso e in condizioni non perfette, che non potrebbero allevare maschi competitivi, conviene fare figlie femmine. Poste queste numerose eccezioni di distorsione adattativa della proporzione fra maschi e femmine, la regola in natura sembra tuttavia essere quella di una salomonica divisione a metà. Perché sopportare tutti questi maschi, quando ne basterebbe uno ogni tanto?

Come notò già uno dei padri della genetica di popolazione, Ronald A. Fisher, si tratta di una conseguenza della selezione naturale che agisce sul vantaggio riproduttivo del singolo individuo, anche se l'effetto complessivo non è ottimale per la specie: se in una popolazione c'è uno squilibrio a favore delle femmine, una madre in grado di generare più maschi avrà un vantaggio riproduttivo perché i suoi figli si accoppieranno più facilmente e le daranno più nipoti. Se ci fosse un gene connesso a questo tratto, avrebbe sicuro successo. Viceversa, se il numero di maschi aumenta troppo, le loro possibilità di accoppiarsi diminuiscono e varrà il processo inverso a favore di madri che generano più femmine. Il risultato è un bilanciamento selettivo che si stabilizza su una percentuale tendenzialmente pari fra maschi e femmine.

Il sesso forte è momentaneamente salvo, ma ciò ancora non spiega perché, se è dimostrato che se ne può fare a meno, si è evoluto questo complesso macchinario. L'indizio fornito dal sesso dei batteri è decisivo: deve esserci qualcosa di utile nel rimescolamento dei geni. Secondo Fisher, la fusione dei genomi e la ricombinazione garantite dalla riproduzione sessuale hanno effetti decisivi sulla velocità di adattamento delle specie perché permettono l'associazione e la diffusione delle rare mutazioni favorevoli che insorgono nelle popolazioni.

In una linea asessuale, due mutazioni favorevoli, per sommarsi, dovrebbero comparire, con estrema improbabilità, nello stesso individuo. Se invece sono portate rispettivamente da due genitori maschio e femmina, almeno un quarto della loro prole le avrà entrambe in omozigosi. L'accumulo di riassortimenti e di combinazioni sessuali positive

## I paradossi del sesso animale

Si fa presto a dire sesso, come fosse uguale per tutti. In realtà, all'interno del fenomeno che chiamiamo riproduzione sessuale gli esseri viventi hanno evoluto una miriade di strategie diverse, e a volte all'apparenza bizzarre, per assicurarsi la trasmissione dei geni.

**LE FEMMINE DEL FOSSA,** il più grande mammifero carnivoro del Madagascar, sviluppano durante l'infanzia un clitoride quasi identico al pene maschile, che scompare con la maturità. Pare che serva a tenere a distanza i maschi finché non sono pronte per la riproduzione.

**LE 25 SPECIE DI ISTRICE** sono monogame, e sono gli unici roditori conosciuti che praticano attività sessuale anche quando non è possibile il concepimento. Altro fatto insolito per i roditori, dopo la gestazione nasce un solo cucciolo, con un corredo di aculei già completo.

**IL MASCHIO DEL GATTO** marsupiale settentrionale si accoppia con violenza, e spesso non si riprende dallo sforzo. Nel giro di una settimana o due muore: così la competizione per il cibo cala e cuccioli e femmine hanno più possibilità di sopravvivere.

**NELLE PIOVRE, IL MASCHIO** usa per l'accoppiamento un braccio con un'estremità prensile che ripone lo sperma in una fessura del mantello della femmina e si trancia, rimanendo conficcato nella partner. Il braccio sessuale è l'unico arto che non può rigenerarsi.

**I BONOBO, O SCIMPANZÈ PIGMEI,** celebri per la loro promiscuità sessuale, con la quale risolvono le controversie sociali, sono anche gli unici animali – esseri umani a parte – a praticare sesso faccia a faccia. Non lo fanno nemmeno gli scimpanzè, i nostri (e loro) parenti più stretti.

permette, per selezione naturale, una propagazione sufficientemente veloce delle mutazioni favorevoli nelle popolazioni.

Questa funzione di «propellente» per la selezione è rafforzata dal suo reciproco: la difesa da mutazioni dannose. Il principale difetto della clonazione infatti è che una variazione leggermente svantaggiosa può essere risparmiata dalla selezione e trascinarsi lungo la discendenza, accumulandosi irreversibilmente insieme ad altri piccoli danni genetici. Come ha scoperto Alexey S. Kondrashov nel 1988, la ricombinazione sessuale permette invece di eliminare più facilmente le mutazioni dannose perché i figli le ereditano solo in parte e la selezione naturale epurerà le combinazioni meno efficienti. Secondo questa «teoria mutazionale», se il tasso di mutazioni leggermente dannose in una popolazione è al di sopra di una certa soglia, il sesso diventa vantaggioso, e ciò spiegherebbe perché è così difficile farne a meno da 2 miliardi di anni.

### La precaria sopravvivenza del maschio

I maschietti possono dunque tirare un respiro di sollievo, anche perché una volta innescata l'evoluzione della riproduzione sessuale negli organismi pluricellulari si è generata una divaricazione in due generi soltanto, maschile e femminile, che a parte i funghi e pochi altri casi è pressoché universale. Da un certo punto in poi della sua storia, raramente l natura si è sbizzarrita con tre o più generi sessuali. La causa fondamentale di questa dualità risiede nel fenomeno dell'anisogamia, cioè del dimorfismo fra due tipologie di gameti: pochi, grandi, costosi e immobili quelli femminili; numerosi, solitamente piccoli, economici e mobili quelli maschili.

Le uova rispondono alla logica evolutiva di produrre pochi gameti, ma ricchi di nutrienti che garantiscano maggiori possibilità di sopravvivenza all'embrione, mentre gli spermatozoi alla logica evolutiva di produrre molti gameti mobili in grado di fecondare più uova possibile e di parassitarne le risorse. Le due strategie si ritrovano peraltro nella conformazione della prole: alcune specie producono pochi figli, sui quali investire ingenti risorse parentali; altre preferiscono invece disperderne moltissimi contando sui grandi numeri. Nella riproduzione sessuale, però, le due logiche si affrontano nei due sessi della stessa specie. Da qui la radice dei diversi interessi evolutivi di maschi e femmine che portano spesso a conflitti e competizioni. Ancora una volta il motore del cambiamento sembra essere la diversità di strategie che coevolvono.

Lo spettro dell'imminente inutilità del maschio riaffiora, tuttavia, se pensiamo a un'altra ingegnosa soluzione riproduttiva: quella di fare tutto da soli, il maschio e la femmina, in un unico individuo che si autofeconda. In effetti, se l'incontro fisico fra uova e spermatozoi è particolarmente difficile e se il costo di produrre e disseminare spermatozoi non è alto – come spesso per le piante e per gli animali marini fissati a un substrato – l'ermafroditismo è un'eccellente soluzione. In questo caso, come pure per quei pesci ermafroditi «sequenziali» in grado di cambiare sesso in certe fasi della loro vita, non è comunque violata la regola dei due gameti eterogenei che si fondono. Ci aspetta dunque un futuro di comodo ermafroditismo? Per ora almeno i maschi dei vertebrati sono al riparo, perché la loro struttura di produzione degli spermatozoi è troppo costosa e conviene tenere i sessi separati.

Chris Hellier/Corbis (*fossa*); Jim Zuckerman/Corbis (*istrice*); Jason Edwards/National Geographic/Getty Images (*gatto marsupiale*); Stuart Westmorland/Corbis (*piovra*); Frans Lanting/Corbis (*bonobo*)

Sinclair Stammers/SPL/Contrasto (*rotifero*); Peter Bond/Em Centre/Università di Plymouth/SPL/Contrasto (*polline*)

### Scandalosi rotiferi

Il biologo John Maynard Smith li definì «uno scandalo evolutivo». Se infatti la riproduzione asessuata nel mondo animale non è una notizia, lo è il fatto che un'intera classe di organismi pluricellulari, composta da oltre 500 specie, continui a prosperare ed evolversi per 100 milioni di anni riproducendosi soltanto per partenogenesi. I rotiferi bdelloidei, microscopici invertebrati acquatici, sono infatti tutti di sesso femminile, e generano da uova non fecondate figlie geneticamente identiche alle madri. Questo però non ha impedito loro di assicurarsi la variabilità necessaria per adattarsi ai mutamenti ambientali avvenuti in un arco di tempo così lungo. Il segreto, secondo una ricerca del 2008, sarebbe la capacità di inglobare nel loro DNA frammenti di genoma «alieno»: non solo di rotiferi di altre specie, ma anche di organismi molto diversi, come funghi o batteri. *(cb)*

NELLE PIANTE SUPERIORI (gimnosperme e angiosperme), il polline è il gamete maschile. Sopra, microfotografia elettronica di grani di polline di ranuncolo dei fossi (*Ranunculus repens*).

### Perché gli asessuali non ritornano?

Ma le difficoltà interpretative non sono finite. Le ipotesi mutazionali sono oggi suffragate da ottimi dati sperimentali. Tuttavia non risolvono un problema tipico della spiegazione evoluzionistica. La meiosi, seppur costosa, immette nelle popolazioni biologiche massicce dosi di variazione, la linfa vitale dell'evoluzione. Però, sia nel caso dell'aumento del tasso di accumulo di mutazioni favorevoli sia nel caso della pulizia da mutazioni nocive, si tratta di vantaggi non immediatamente percepibili dall'individuo che si riproduce sessualmente. I loro effetti si vedranno nelle generazioni successive, ma sappiamo da Darwin che la selezione naturale non prevede il futuro e agisce solo sul «qui e ora» concreto della sopravvivenza differenziale.

Se dunque non scoviamo un vantaggio diretto per l'individuo, ci esponiamo all'obiezione classica della «sovversione interna», cioè non riusciamo a spiegare perché nel corso della storia naturale gli individui che si riproducono sessualmente non vengano puntualmente sbaragliati da quelli asessuali.

Questi ultimi infatti, non avendo il costo del maschio, possono far leva su una più alta frequen-

P. Motta/Dipartimento di anatomia, Università «La Sapienza», Roma/SPL/Contrasto

NUMEROSI, GENERALMENTE PICCOLI, mobili ed economici, gli spermatozoi rispondono alla logica evolutiva di fecondare più uova possibile, parassitandone le risorse. A fronte, microfotografia di spermatozoi umani in un tubulo seminifero. Sotto, divisione mitotica di una cellula dell'epidermide.

Steve Gschmeissner/SPL/Contrasto

**La selezione sessuale spiega l'esistenza di caratteri appariscenti e costosi che mettono potenzialmente a repentaglio la sopravvivenza di chi li possiede, ma garantiscono maggiori possibilità di riproduzione**

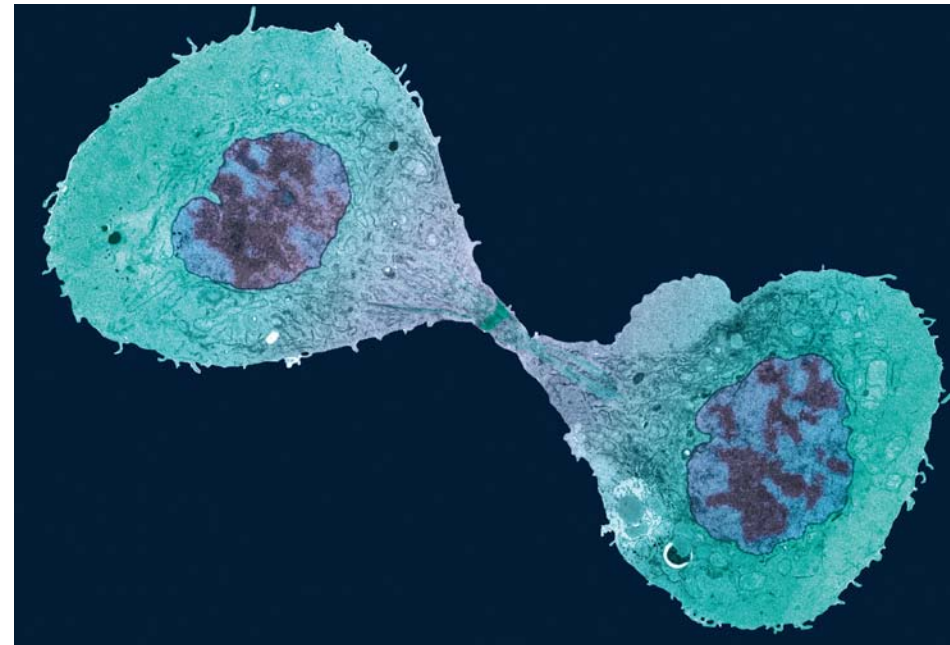
za di diffusione nella popolazione. In poche decine di generazioni le femmine asessuali diventerebbero la quasi totalità della popolazione, eppure simili fenomeni di invasione di organismi asessuali si sono verificati raramente in natura.

È un problema analogo a quello che si pone per l'evoluzione dell'altruismo e di altri comportamenti che in prima battuta non sono favorevoli al singolo individuo. Possiamo capirne l'utilità «sociale» in termini di selezione di gruppo, ma occorre anche spiegare perché, quando un comportamento altruistico inizia a emergere in una popolazione, non venga subito sovvertito internamente dal *free rider* egoista, il quale godrebbe del doppio vantaggio selettivo di fare i propri interessi e al contempo di sfruttare l'altruismo dei compagni. La struttura della popolazione (per esempio, se divisa in piccoli gruppi), le condizioni ambientali e le caratteristiche del tratto adattativo devono essere tali da garantire un vantaggio immediato al portatore.

Se la selezione agisce subito sulla progenie, e non in previsione, la soluzione dell'enigma dovrà allora trovarsi nelle caratteristiche adattative della prole: meglio clonare individui geneticamente identici al genitore o avere discendenti diversificati fra loro?

Dipende dalla velocità di cambiamento dell'ambiente circostante, suggerì William Hamilton negli anni ottanta: se il contesto delle pressioni selettive è stabile, conviene la prima soluzione; se è mutevole, la seconda. Ma per compensare il costo dei maschi e offrire vantaggi immediati l'ambiente deve cambiare a una velocità tale da essere percepibile al passaggio da una generazione all'altra e rendere così conveniente il sesso già nel breve periodo. Secondo Hamilton, l'unica componente dell'ecosistema con queste caratteristiche è la resistenza ai parassiti e alle malattie.

La riproduzione sessuale garantirebbe cioè un'incessante diversificazione genetica di generazione in generazione, obbligando gli aggressori ad aggiustare continuamente il tiro. In questo modo l'ospite, ricombinando di volta in volta il corredo genetico nei discendenti, lotta contro la sempre nutrita schiera dei suoi parassiti, che sono più veloci nel mutare e nell'aggirare le sue difese. Bisogna correre sempre (ovvero diversificarsi) per poter restare fermi nello stesso posto, secondo la famosa metafora della Regina Rossa che Leigh Van Valen mutuò da *Alice nel paese delle meraviglie*.

Il dibattito resta aperto, perché non è facile comparare lignaggi sessuali e asessuali che condividano ambiente e parassiti. Quando ci si riesce, come per una lumaca lacustre neozelandese studiata in questi anni da Curt Lively e colleghi, la Regina Rossa sembra in azione. Ancora una volta, il segreto risiederebbe nella capacità di produrre diversità, quella che manca a una popolazione uniforme di cloni, vulnerabile agli attacchi pandemici degli agenti patogeni.

## Il sesso arricchisce il mondo

Possiamo a questo punto immaginare un quadro esplicativo plausibile di tipo «pluralista». Secondo Adam Wilkins e Robin Holliday, per capire il sesso occorre comprendere l'evoluzione del sofisticato macchinario della meiosi, che potrebbe essere la causa innescante, e non soltanto un mezzo della riproduzione sessuale. La meiosi – una volta formatesi negli eucarioti cellule diploidi con genomi sempre più grandi – sarebbe emersa come meccanismo di difesa dai rischi di ricombinazioni nocive fra cromosomi non omologhi. Da qui la fase intermedia della produzione di gameti aploidi, da unire poi più ordinatamente nella riproduzione sessuale.

Così però resterebbero allettanti le soluzioni asessuali. La meiosi, tuttavia, introduce una nuova possibilità, il cui costo – secondo i modelli di Lilach Hadany e Sarah Otto – potrebbe essere stato pagato all'inizio solo occasionalmente, in presenza di stress ambientali. L'indizio è dato da alcune piante e dal lievito che, in effetti, optano per la riproduzione sessuale solo durante periodi di crisi, preferendo quella asessuale nel resto del tempo, probabilmente perché il sesso permette loro di produrre prole in grado di adattarsi alle nuove condizioni ambientali. Una conferma del valore mutazionale o «variazionale» del sesso e del fatto che probabilmente le tre funzioni che giocano a favore della sessualità (accumulo di mutazioni positive, prevenzione da mutazioni deleterie, difesa dai parassiti) potrebbero aver agito come un complesso di concause.

Di crisi in crisi, i geni connessi al sesso si diffusero nella popolazione, unitamente alle prime preferenze di accoppiamento fra individui dei due sessi. L'evoluzione si arricchì così di un meccanismo nuovo e potente, descritto da Darwin in *L'origine dell'uomo, e la selezione in rapporto al sesso*, del 1871: la selezione sessuale, forza cruciale di cambiamento capace di spiegare l'esistenza di molti caratteri appariscenti e costosi – come ornamenti e strategie di corteggiamento – che mettono potenzialmente a repentaglio la sopravvivenza di chi li possiede, ma garantiscono maggiori possibilità di riproduzione.

Mentre nella selezione naturale il successo riproduttivo differenziale è una conseguenza della capacità di sopravvivere meglio e di raggiungere l'età riproduttiva, nella selezione sessuale si compete direttamente per il successo riproduttivo. Le corna maestose, le zanne feroci e la stazza di un maschio offrono un vantaggio nella lotta con altri maschi – a volte simbolica, a volte realmente violenta – per la conquista delle femmine, la «selezione intrasessuale». In modo meno gladiatorio, un'enorme quantità di caratteri «estetici» – dai canti alle danze di esibizione, dai colori del manto ai piumaggi sgargianti – ha invece la funzione di rendere più attraenti alcuni maschi di altri al cospetto dei potenziali partner: in questo caso sono le femmine a scegliere attivamente con chi accoppiarsi («selezione intersessuale»). In un caso e nell'altro, il premio della selezione è direttamente il successo riproduttivo.

È impossibile sottovalutare quanto il sesso abbia reso più interessante la storia naturale, introducendo per esempio squilibri creativi come la diffusione della promiscuità sessuale femminile e la conseguente insicurezza del maschio circa la paternità, da cui discende un'intera cascata di riadattamenti e di strategie comportamentali. Inoltre, nelle specie con una vita sociale complessa l'accoppiamento, eterosessuale e omosessuale, non ha più soltanto una funzione strettamente riproduttiva. Darwin era convinto che la reciproca scelta sessuale avesse persino plasmato gran parte delle differenze di aspetto degli esseri umani nei diversi popoli della Terra. Comunque sia, l'oscurità che il naturalista inglese vedeva attorno alle origini del sesso non si è ancora diradata, anche se innumerevoli indizi suggeriscono dove cercare la soluzione dell'enigma: nel prezioso combustibile che fa girare da sempre il motore dell'evoluzione e che chiamiamo diversità. ■

## ➥ Letture


**On the Origin of Sexual Reproduction.** Zimmer C., in «Science», Vol. 324, pp. 1254-1256, 5 giugno 2009.

**Lost Sex: The Evolutionary Biology of Parthenogenesis.** Schön I., Martens K. e van Dijk P. (*a cura*), Springer, 2009.

**Sesso ed evoluzione.** Pilastro A., Bompiani, 2007.

**Cromosoma Y. Viaggio alla scoperta del mistero uomo.** S. Jones, Orme Editori, 2007.

**La Regina Rossa. Sesso ed evoluzione.** Ridley M., Instar Libri, 2003.

**The Evolution of Sex.** Maynard Smith J., Cambridge University Press, 1978.

**Sex and Evolution.** Williams G.C., Princeton University Press, 1975.

ORIGINI

# LA MENTE

di Marc Hauser

**Per ricostruire come è emersa la mente umana, il primo passo è individuare ciò che distingue i nostri processi mentali da quelli di altre creature**

## IN SINTESI

- Charles Darwin affermava che esiste una continuità tra la mente degli esseri umani e quella degli altri animali, un punto di vista ripreso e sostenuto anche dagli studiosi venuti dopo di lui.
- Aumentano però le prove che il divario mentale che ci separa dalle altre specie è largo e profondo. L'autore di questo articolo ha individuato quattro caratteristiche esclusive dell'attività cognitiva umana.
- L'origine e l'evoluzione di questi tratti mentali distintivi sono ancora in larga parte misteriosi, ma stanno via via emergendo indizi che ci possono aiutare a far luce sul problema.

Qualche tempo fa, tre alieni scesero sulla Terra per indagare sulla presenza di vita intelligente. Uno era specializzato in ingegneria, uno in chimica e il terzo in scienze computazionali. Rivolgendosi ai colleghi, l'ingegnere disse: «Tutte le creature di questo pianeta sono solide e alcune presentano segmentazione. Hanno capacità di movimento sul terreno, nell'acqua o nell'aria, e sono tutte estremamente lente. Niente di speciale, insomma». Il chimico aggiunse: «Sono tutte molto simili, derivate da diverse sequenze di quattro ingredienti chimici». Poi venne l'opinione dell'informatico. «Le loro capacità di calcolo sono limitate. Ma c'è una creatura, il bipede implume, che non è come le altre. Scambia informazioni in modo primitivo e inefficiente ma notevolmente diverso da tutti gli altri. Costruisce molti strani oggetti, tra cui alcuni che si possono consumare, altri che producono simboli, e altri ancora che distruggono membri della sua stessa tribù». «Come può essere?», domandò l'ingegnere. «Date le somiglianze nella forma e nella chimica, come fanno ad avere capacità di calcolo diverse?». «Non ne sono sicuro», confessò l'esperto di calcolo. «Ma a quanto pare hanno un sistema per creare nuove espressioni che è infinitamente più potente di quelli di tutti gli altri tipi di esseri viventi. Propongo di classificare il bipede implume in un gruppo diverso dagli altri animali: deve avere un'origine diversa e provenire da un'altra galassia». Gli altri due alieni annuirono, e tutti e tre si teletrasportarono a casa a presentare rapporto.

Criticare i tre alieni per aver classificato gli esseri umani in una categoria separata rispetto ad api, uccelli, castori e bonobo sarebbe ingiusto. Dopo tutto la nostra specie è l'unica a creare soufflé, computer, armi da fuoco, cosmetici, opere liriche, sculture, equazioni, leggi e religioni. Le api e i bonobo non solo non hanno mai cucinato un soufflé, ma neppure hanno mai contemplato la possibilità di farlo, perché non hanno un cervello dotato contemporaneamente di competenza tecnologica e creatività gastronomica.

In *L'origine dell'uomo*, Charles Darwin sostenne che la differenza tra mente umana e menti non umane è «di grado e non di tipo». Gli studiosi hanno condiviso a lungo questo punto di vista, sottolineando in tempi recenti le prove genetiche che indicano che condividiamo circa il 98 per cento dei geni con gli scimpanzè. Ma se la nostra eredità genetica può spiegare le origini evolutive della mente umana, come mai non è uno scimpanzè a scrivere questo articolo, o a suonare con i Rolling Stones, o a preparare un soufflé? In realtà, una massa crescente di prove indica che, in contrasto con la teoria di Darwin della continuità della mente fra l'uomo e le altre specie, c'è una profonda separazione tra il nostro intelletto e quello degli animali. Questo non significa

che le nostre facoltà mentali siano saltate fuori dal nulla già pienamente formate. I ricercatori hanno individuato alcuni elementi costitutivi delle facoltà cognitive umane in altre specie. Questi elementi costitutivi, però, sono solo l'impronta proiettata sul terreno da quel grattacielo che è la mente umana. Le origini evolutive delle nostre abilità cognitive rimangono quindi piuttosto nebulose. Un po' di luce, però, sta arrivando da nuove intuizioni e tecniche sperimentali.

## Singolarmente intelligenti

Se vogliamo arrivare a svelare il modo in cui ha avuto origine la mente umana, dobbiamo in primo luogo individuare esattamente ciò che la separa dalle menti delle altre specie. Benché gli esseri umani condividano gran parte dei geni con gli scimpanzè, vari studi fanno pensare che i sottili cambiamenti genetici avvenuti nella linea di discendenza umana dopo la separazione da quella degli scimpanzè abbiano prodotto massicce differenze nelle capacità di calcolo. Questi processi di riarrangiamento, cancellazione e copia di una serie di elementi genetici universali hanno prodotto un cervello che ha quattro proprietà speciali. Messe insieme, queste quattro caratteristiche distintive, che ho recentemente identificato in base a studi condotti nel mio laboratorio e in altre sedi, costituiscono quel che io chiamo *humanuniqueness* [il termine, coniato fondendo le parole inglesi *human* e *unique* con l'aggiunta del suffisso *-ness*, che serve a ottenere un sostantivo da un aggettivo, potrebbe essere tradotto come «umanunicità», vale a dire la nostra unicità di esseri umani, N.d.T.].

Il primo di questi tratti è la computazione generativa, cioè la capacità di generare una varietà virtualmente illimitata di «espressioni», che si tratti di disporre parole, note musicali, combinazioni di azioni o stringhe di simboli matematici. La computazione generativa comprende due tipi di operazioni: ricorsive e combinatorie. Le operazioni ricorsive consistono nell'uso ripetuto di una regola per creare nuove espressioni. Si pensi a come sia possibile inserire una breve frase all'interno di un'altra frase, anche più di una volta, per creare nuove e più ricche descrizioni dei nostri pensieri. Per esempio la semplice ma poetica espressione di Gertrude Stein: «Una rosa è una rosa è una rosa». Le operazioni combinatorie, d'altro canto, consistono nel mescolare elementi separati e distinti per dar luogo a nuove idee, che possono essere espresse con nuove parole (come *walkman*, composto dalla parola inglese che significa «camminare» combinata con quella che significa «uomo») o con nuove forme musicali, o in molti altri modi.

## GLI INGREDIENTI CHIAVE DELLA MENTE UMANA

**I quattro tratti elencati di seguito distinguono la mente umana da quelle animali. Per scoprire le origini della nostra mente bisognerà spiegare in che modo sono emerse queste proprietà distintive.**

**LA COMPUTAZIONE GENERATIVA**
consente agli esseri umani di creare una varietà virtualmente illimitata di parole, concetti e oggetti. Questa caratteristica abbraccia due tipi di operazioni: le operazioni ricorsive e quelle combinatorie. Ricorsivo è l'uso ripetuto di una regola per generare nuove espressioni. Un'operazione combinatoria è la mescolanza di elementi discreti per generare nuove idee.

**LA COMBINAZIONE PROMISCUA**
delle idee permette la mescolanza di domini di conoscenza diversi – come arte, sesso, spazio, causalità e amicizia – generando grazie a essa nuove leggi, relazioni sociali e tecnologie.

**I SIMBOLI MENTALI**
codificano esperienze sensoriali sia reali che immaginate, e fanno da base a un ricco e complesso sistema di comunicazione. Questi simboli possono essere tenuti per sé o comunicati agli altri sotto forma di parole o immagini.

**IL PENSIERO ASTRATTO**
permette di riflettere su cose che vanno al di là di ciò che possiamo sentire, udire, toccare, assaggiare o annusare.

La seconda caratteristica distintiva della mente umana è la sua capacità di combinare le idee in maniera promiscua. Per noi è del tutto normale collegare pensieri che provengono da domini di conoscenza diversi, il che ci permette di combinare le nostre concezioni dell'arte, del sesso, dello spazio, della causalità e dell'amicizia. Da queste mescolanze possono nascere nuove leggi, relazioni sociali e tecnologie, come quando decidiamo che è proibito [dominio morale] spingere [dominio dell'azione motoria] intenzionalmente [dominio della psicologia ingenua] una persona sotto un treno [dominio degli oggetti] per salvare la vita [dominio morale] di altre cinque [dominio aritmetico] persone.

Al terzo posto della mia lista delle proprietà che ci definiscono c'è l'uso dei simboli mentali. Noi siamo in grado di convertire spontaneamente qualsiasi esperienza sensoriale – reale o immaginaria – in un simbolo, che poi possiamo tenere per noi o esprimere agli altri attraverso il linguaggio, l'arte, la musica o le righe di codice per computer.

In quarto luogo, gli esseri umani sono i soli che si impegnano in forme di pensiero astratto. Contrariamente ai pensieri degli animali, ancorati in larga misura nell'esperienza sensoriale e percettiva, molti dei nostri pensieri non hanno alcuna chiara connessione con tali eventi. Solo noi ci mettiamo a ponderare su roba come alieni e unicorni, sostantivi e verbi, Dio e l'infinito.

Anche se c'è disaccordo fra gli antropologi su quando abbia esattamente preso forma la mente umana moderna, dalla documentazione archeologica è chiaro che in un arco di tempo relativamente breve della storia evolutiva si è verificata una trasformazione di grande rilievo, che ha avuto inizio circa 800.000 anni fa, nell'era Paleolitica, e ha avuto un crescendo intorno a 45.000-50.000 anni fa. È durante questo periodo, un battito di ciglia nei tempi dell'evoluzione, che vediamo per la prima volta attrezzi articolati in più parti; ossa di animali forate per farne strumenti musicali; sepolture con corredi che fanno pensare a gusti estetici e credenze in un aldilà; pitture rupestri ricche di simboli; e il controllo del fuoco, una tecnologia che combina le nostre concezioni ingenue della fisica e della psicologia, e che permise ai nostri antenati di affermarsi in ambienti nuovi assicurandosi il calore e cuocendo i cibi per renderli commestibili.

Queste reliquie del passato sono una straordinaria testimonianza dei tanti modi in cui i nostri antenati si sono sforzati di risolvere i nuovi problemi posti dall'ambiente e di esprimersi con creatività, modi che ne hanno poi segnato le specifiche e distinte identità culturali. Tuttavia, le testimonianze



LA COMPUTAZIONE GENERATIVA da parte degli esseri umani ma non degli altri animali è riflessa dall'uso degli attrezzi. Contrariamente alle altre specie che usano attrezzi, i cui strumenti sono fatti di un unico materiale e rivolti a un unico scopo, gli esseri umani combinano normalmente diversi materiali per realizzare i loro strumenti, e spesso usano uno stesso attrezzo in vari modi diversi. Qui, un orangutan impiega una semplice foglia come ombrello, mentre gli esseri umani usano una matita fatta di diversi materiali per tutta una serie di scopi differenti.

Cortesia Lilan Hauser (*Hauser*); Jh Pete Carmichael/Getty Images (*orangutan*); Patrick Lane/Somos Images/Corbis (*scrittura su quaderno*); William Whitehurst/Corbis (*matita in un libro*); Alin Dragulin/Getty Images/Vico Collective (*cancellazione con gomma di matita*); Brad Wilson/Getty Images (*matita nei capelli*)

archeologiche rimarranno per sempre mute sulle origini e le pressioni selettive che hanno condotto ai quattro elementi di cui è costituita la nostra unicità di esseri umani. Le splendide pitture delle grotte di Lascaux, per esempio, indicano che i nostri antenati comprendevano la duplice natura delle immagini dipinte: che sono oggetti ma a loro volta si riferiscono ad altri oggetti ed eventi. Ma non ci dicono se quei pittori, e coloro che li ammiravano, esprimevano il loro apprezzamento estetico di quelle opere d'arte per mezzo di simboli organizzati in classi grammaticali (nomi, verbi, aggettivi) oppure se immaginavano di trasmettere quelle idee altrettanto bene mediante suoni o segni, a seconda del buon funzionamento dei loro apparati sensoriali. Analogamente, nessuno degli antichi strumenti musicali ritrovati – come i flauti di avorio e osso di 35.000 anni fa – ci racconta di come erano usati, se ripetendo più e più volte le stesse poche note, o invece incorporando ricorsivamente diversi temi l'uno dentro l'altro.

Ciò che possiamo dire con certezza è che tutti gli esseri umani, dai cacciatori-raccoglitori della savana africana agli agenti di borsa di Wall Street, dispongono fin dalla nascita dei quattro elementi che definiscono l'unicità degli esseri umani. Il modo in cui questi elementi si combinano a creare culture varia però considerevolmente da un gruppo all'altro. Le culture umane possono differire nella lingua, nelle composizioni musicali, nelle norme morali e negli artefatti. Dal punto di vista di una cultura, le pratiche di un'altra appaiono spesso bizzarre, a volte sgradevoli, di frequente incomprensibili e talora immorali. Nessun altro animale esibisce tanta varietà di stili di vita.

Gli altri animali sono però rilevanti per capire l'origine della mente umana. In effetti, l'unico modo per riuscire a ricostruire la storia della nostra *humanuniqueness* è capire quali delle nostre capacità sono condivise dagli altri animali e quali sono invece esclusivamente nostre.

**L'AUTORE**

**MARC HAUSER è professore di psicologia, biologia evoluzionistica umana e biologia evoluzionistica e degli organismi alla Harvard University. Studia i fondamenti, in termini di evoluzione e di biologia dello sviluppo, della mente umana, con lo scopo di determinare quali capacità mentali gli esseri umani hanno in comune con altri animali non umani e quali siano invece esclusivamente nostre.**

## Belle teste

Quando la più piccola delle mie figlie aveva tre anni, le chiesi che cos'è che ci fa pensare. Lei puntò il dito verso la propria testa e disse: «Il cervello». Allora le domandai se anche gli altri animali avevano il cervello, cominciando dai cani e le scimmie, per poi passare agli uccelli e ai pesci. Lei rispose di sì. Quando però le chiesi della formica la risposta fu: «No. Troppo piccola».

Noi adulti sappiamo che le dimensioni non sono un buon indicatore per stabilire se un animale ha un cervello, anche se in effetti le dimensioni in-

Andrew Swift

Art Wolfe/Getty Images (*leone*); Reuters/Corbis (*Dalai Lama*)

fluiscono su alcuni aspetti della struttura cerebrale e, di conseguenza, del pensiero. E la ricerca ha mostrato che la maggior parte dei tipi cellulari presenti nel cervello, insieme ai relativi messaggeri chimici, sono gli stessi per tutti i vertebrati, esseri umani compresi. Per di più, l'organizzazione generale delle strutture dello strato più esterno del cervello, la corteccia cerebrale, è in larga misura la stessa nelle piccole scimmie, nelle grandi scimmie antropomorfe e negli esseri umani. In altre parole, gli esseri umani hanno un buon numero di caratteristiche cerebrali in comune con altre specie. Gli aspetti in cui invece siamo differenti sono la diversa dimensione di alcune regioni della corteccia e il modo in cui queste regioni si collegano tra loro: differenze che danno origine a pensieri che non hanno confronto in tutto il resto del regno animale.

In effetti, gli animali mostrano alcuni comportamenti raffinati e complessi che sembrano preannunciare le nostre capacità. Per esempio la capacità di produrre o modificare oggetti in vista di un particolare scopo. I maschi dell'uccello giardiniere costruiscono magnifiche strutture architettoniche fatte di ramoscelli, e poi le decorano con piume, foglie e sassolini per attirare le femmine. I corvi della Nuova Caledonia ricavano dai fili d'erba una sorta di ami da pesca con cui catturano gli insetti. Alcuni scimpanzè sono stati visti servirsi di lance di legno per infilzare scimmie più piccole che si erano rifugiate nelle spaccature degli alberi. Inoltre, studi sperimentali condotti su diversi animali hanno rivelato l'esistenza di una fisica ingenua innata che permette di andare oltre l'esperienza diretta, generalizzandola fino a trovare nuove soluzioni. In uno di questi esperimenti, oranghi e scimpanzè posti di fronte a un cilindro di plastica fissato a una base, in fondo a cui c'era una nocciolina, sono riusciti a prendere il cibo riempiendosi la bocca d'acqua per poi sputarla nel cilindro, sollevando la nocciolina per galleggiamento fino all'orlo del recipiente.

Gli animali esibiscono anche alcuni comportamenti sociali analoghi a quelli umani. Alcune formiche, più esperte, insegnano alle più giovani la strada per arrivare a risorse alimentari essenziali. I suricati addestrano i cuccioli nell'arte di smembrare gli scorpioni, letali ma buoni da mangiare. E una serie di studi recenti ha dimostrato che molti animali assai diversi tra loro protestano quando il cibo viene distribuito in modo ingiusto, mostrando quella che gli economisti chiamano «avversione all'iniquità». Ancora più importante è il fatto che un'ampia mole di dati dimostra che gli animali non sono imprigionati nei consueti comportamenti quotidiani quando si tratta di difendere il proprio posto nella gerarchia del gruppo prendersi cura dei piccoli o cercare nuovi partner con cui allearsi o accoppiarsi. Essi sono anzi in grado di rispondere prontamente alle novità che si presentano nell'ambiente sociale, come quando un animale subordinato ma dotato di qualche abilità particolare di cui i suoi simili sono privi ottiene dei favori da parte di individui di posizione sociale superiore alla sua.

Queste osservazioni ispirano un senso di meraviglia per la bellezza delle soluzioni cui può giungere l'attività di «ricerca e sviluppo» della natura. Ma una volta superato questo brivido ci troviamo comunque di fronte all'ampio divario che separa gli esseri umani dalle altre specie. Per mostrare appieno l'estensione di questo divario, e le difficoltà che si incontrano nel tentativo di decifrare il modo in cui si è prodotto, vorrei ora descrivere più in dettaglio in che cosa consiste la *humanuniqueness*.

## Distanze mentali

Uno dei più semplici strumenti umani, la matita, illustra bene l'eccezionale libertà della nostra mente in confronto alla limitata portata della cognizione animale. Noi teniamo in mano del legno dipinto, scriviamo con una mina e cancelliamo con una gomma rosa fermata da un anello metallico. Quattro materiali diversi, ciascuno dei quali ha una sua particolare funzione, associati in un unico attrezzo. E, malgrado sia fatto per scrivere, quell'attrezzo può anche servire a fermare una crocchia di capelli, a fare da segnalibro, a infilzare un insetto molesto.

Gli utensili degli animali, invece – come gli stecchi usati dagli scimpanzè per pescare le termiti dal termitaio – sono fatti di un solo materiale e per un unico scopo, e non sono mai usati per altre funzioni. Nessuno ha le proprietà combinatorie della matita. Un altro semplice attrezzo, il bicchiere telescopico che fa spesso parte dell'attrezzatura dei campeggiatori, ci offre un esempio della ricorsività in azione. Per costruirlo basta seguire una sola semplice regola – aggiungere all'ultimo segmento un segmento di dimensioni più grandi – e applicarla più volte fino a raggiungere la dimensione desiderata. Gli esseri umani usano operazioni ricorsive simili a queste praticamente in tutti gli aspetti della vita mentale, dal linguaggio alla musica, alla matematica alla generazione di una gamma illimitata di movimenti da eseguire con gambe, braccia e bocca. Gli unici barlumi di ricorsività negli animali, invece, vengono dall'osservazione del modo in cui funzionano i loro sistemi motori.

Tutti gli esseri viventi sono dotati di apparecchiature motorie ricorsive come parte del loro normale equipaggiamento operativo. Per camminare, mettono un piede davanti all'altro, più e più volte. Per mangiare, afferrano un oggetto e lo portano alla bocca, ripetendo queste azioni finché lo stomaco non invia un segnale di arresto. Nella mente animale, questo sistema ricorsivo è confinato nelle regioni motorie del cervello e «spento» nelle altre zone cerebrali. Ciò suggerisce che un passo critico nell'acquisizione del nostro particolare tipo di pensiero possa essere stato non l'evoluzione della ricorsività come nuova forma di calcolo, ma la liberazione della ricorsività dalla prigione del dominio motorio, e il suo passaggio ad altri domini di pensiero. Il modo in cui è stata liberata da questa funzione restrittiva si lega a un altro dei nostri ingredienti – le interfacce promiscue – sulle quali mi soffermerò più avanti.

Il divario si allarga ancora quando confrontiamo il linguaggio umano con la comunicazione nelle altre specie. Come altri animali, gli esseri umani hanno un sistema di comunicazione non verbale che trasmette emozioni e motivazioni: le risatine e i gridolini dei bambini piccoli fanno parte di questo sistema. Gli esseri umani però sono i soli ad avere un sistema di comunicazione linguistica basato sulla manipolazione di simboli mentali, in cui ogni istanza di simbolo ricade in una categoria specifica e astratta come nome, verbo e aggettivo. Benché alcuni animali abbiano suoni che sembrano rappresentare qualcosa di più delle emozioni, e che trasmettono informazioni su oggetti ed eventi come il cibo, il sesso e la predazione, la gamma di quei suoni impallidisce rispetto alla nostra, e nessuno di essi ricade nelle categorie astratte che strutturano le nostre espressioni linguistiche.

Questa affermazione richiede un chiarimento, perché suscita spesso un estremo scetticismo. Si potrebbe pensare, per esempio, che i vocabolari animali appaiano ristretti perché i ricercatori che li studiano non capiscono di che cosa stanno parlando. Ma benché vi sia ancora molto da imparare sulle vocalizzazioni degli animali, e più in generale sulle loro comunicazioni, ritengo improbabile che l'insufficienza degli studi basti a spiegare il divario che ci separa. La maggior parte degli scambi vocali fra animali consiste in un unico grugnito, o pigolio, o grido, con un unico suono in risposta. È possibile che gli animali comprimano grandi quantità di informazione in un grugnito di 500 millisecondi, magari equivalente a «per piacere, spidocchiami la schiena lì in basso, che poi la spidocchio io a te». Ma allora perché mai noi uma-

**GLI ANIMALI POSSONO USARE** un piccolo gruppo di suoni semplici per rappresentare oggetti ed eventi nel presente, ma la loro gamma di espressioni è assai limitata in confronto a quella degli esseri umani, la cui abilità di pensiero astratto permette inoltre di discutere non solo il futuro e il passato, ma anche concetti astratti, come nel caso degli insegnamenti spirituali del Dalai Lama.

Cervello di orca
**5260 grammi**

Cervello umano
**1350 grammi**

Cervello di toporagno
**0,1 grammi**

## LE MISURE DEI CERVELLI

**Gli esseri umani sono più intelligenti sia di animali dotati di un cervello più grande in termini assoluti, sia di animali il cui cervello è più grande del nostro in termini relativi (rispetto alle dimensioni del corpo), come il toporagno. Le dimensioni, quindi, non bastano da sole a spiegare l'unicità della mente umana.**

PIÙ CHE CONTARE: molte specie animali sanno contare. Ma solo gli esseri umani sono in grado di calcolare la circonferenza della Terra, la velocità della luce o la probabilità di vincere la lotteria. In più, noi sappiamo combinare il nostro sistema numerico con vari altri domini di pensiero: per esempio quello morale, scegliendo se salvare cinque persone invece di una sola.

ni avremmo sviluppato un sistema così arcano e verboso, se avremmo potuto cavarcela con un paio di grugniti?

Per di più, se anche ammettessimo che la danza oscillatoria dell'ape rappresenti simbolicamente il polline che si trova a un chilometro di distanza a nord e che le grida di allarme del cercopiteco nasobianco maggiore rappresentino simbolicamente vari predatori, questo uso dei simboli differisce dal nostro in almeno cinque modi essenziali: è scatenato solo da oggetti o eventi reali, e mai da oggetti o eventi immaginari; è limitato al presente; non fa parte di uno schema di classificazione più astratto, come quello che organizza le nostre parole in nomi, verbi e aggettivi; è raro che sia combinato con altri simboli e, quando lo è, le combinazioni sono limitate a stringhe di due elementi, senza regole; ed è legato in maniera fissa a particolari contesti.

Il linguaggio umano è inoltre notevole – e interamente diverso dai sistemi comunicativi di altri animali – perché funziona bene in modalità sia visiva sia uditiva. Se un uccello canterino perde la voce, o un'ape la capacità di compiere i movimenti oscillatori della danza, la loro attività di comunicazione cessa. Quando un essere umano è sordo, invece, il linguaggio dei segni offre un metodo di comunicazione altrettanto espressivo.

Le nostre conoscenze linguistiche, insieme alla capacità di calcolo che richiedono, interagiscono anche con altri domini di conoscenza in vari affascinanti modi che riflettono in maniera nettissima la nostra capacità esclusivamente umana di operare connessioni promiscue tra sistemi di comprensione diversi. Prendiamo la capacità di quantificare oggetti ed eventi, capacità che condividiamo con altri animali. Molte specie hanno almeno due abilità non linguistiche per contare. Una è precisa e limitata ai numeri inferiori a quattro. L'altra è illimitata nella portata, ma è approssimativa quanto a discriminazione e si limita solo ad alcuni rapporti: un animale capace di distinguere l'uno dal due, per esempio, può anche discriminare il due dal quattro, il 16 dal 32 e così via. Il primo sistema è ancorato a una regione cerebrale coinvolta nel tenere traccia degli individui, mentre l'altro è ancorato in regioni cerebrali che calcolano la grandezza delle cose.

Lo scorso anno i miei colleghi e io abbiamo descritto un terzo sistema di conteggio nei macachi rhesus che può aiutarci a capire le origini della capacità umana di segnare la differenza tra singolare e plurale. Il sistema opera quando gli individui vedono insiemi di oggetti presentati contemporaneamente – e non uno alla volta – e fa sì che i macachi distinguano un oggetto commestibile da molti, ma non molti da molti. Nel nostro esperimento abbiamo mostrato ad alcuni macachi rhesus una mela che abbiamo poi messo in una scatola. Poi abbiamo mostrato cinque mele e le abbiamo messe tutte e cinque in una seconda scatola: le scimmie sceglievano costantemente la seconda scatola. Quando però abbiamo messo due mele nella prima scatola e cinque nell'altra, le scimmie hanno scelto indifferentemente l'una o l'altra, senza mostrare preferenze.

Tim Flach/Getty Images (*macaco*); Richard Schultz/Corbis (*ragazza*)

Hilde Jensen/AP Photo/Università di Tubinga/«Nature» (*statuetta*); Daniel Maurer/AP Photo (*flauto*)

Ma quando il sistema linguistico umano si connette a questo sistema concettuale più antico, succede qualcosa di particolare. Per capire come, provate a fare questo esercizio: dati i numeri 0, 0,2 e –5, accostare a essi la parola più appropriata: scegliereste «mela» o «mele»? Se siete come la maggior parte delle persone, compresi i bambini piccoli, avete scelto la parola «mele». In effetti, avreste scelto «mele» anche per il numero «1,0». Questa non è una regola che abbiamo imparato a scuola, e in effetti, strettamente parlando, non è grammaticalmente corretta. Però fa parte di una regola grammaticale universale che solo noi umani abbiamo fin dalla nascita. È una regola semplice ma astratta: tutto ciò che non è «1» va al plurale.

L'esempio delle mele mostra in che modo sistemi diversi – diverse sintassi e concetti di insiemi – interagiscono producendo nuovi modi di pensare il mondo o intorno al mondo. Ma il processo creativo negli esseri umani non si ferma qui. Noi applichiamo il nostro linguaggio e i nostri sistemi numerici a questioni morali (salvare cinque persone è meglio che salvarne una), economiche (se ricevo 10 dollari in regalo e te ne offro solo uno ti sembrerà un'ingiustizia e rifiuterai l'offerta) e a transazioni proibite (vendere un figlio, anche in cambio di molti soldi, è una cosa che non si fa).

## Pensieri alieni

Dai suricati didattici alle scimmie che odiano le ingiustizie, vale sempre la stessa osservazione: in ciascuno di questi animali si è evoluta una mente che è ben adattata a problemi specifici, ed è quindi limitata quando si tratta di applicare le sue abilità a problemi nuovi. Non è così per noi bipedi implumi. Una volta presente, la mente moderna ha permesso ai nostri antenati di esplorare parti della Terra fino ad allora disabitate, di generare un linguaggio per descrivere eventi nuovi e di immaginare una vita dopo la morte.

Le radici delle nostre capacità cognitive sono ancora in gran parte ignote, ma una volta individuati gli ingredienti esclusivi della mente umana ora si sa che cosa cercare. A tal fine, spero che la neurobiologia si rivelerà illuminante. Malgrado non si sia ancora capito in che modo i geni costruiscano cervelli, e come faccia l'attività elettrica nel cervello a costruire pensieri ed emozioni, oggi siamo testimoni di una rivoluzione nelle scienze della mente che arriverà a colmare questi spazi vuoti.

Per esempio lo studio di animali chimerici – in cui i circuiti cerebrali di un individuo di una specie sono trapiantati in uno di un'altra specie – sta contribuendo a svelare come è configurato il cervello. E gli esperimenti con animali geneticamente modificati stanno portando alla luce geni che svolgono un ruolo nel linguaggio e in altri processi sociali. Questi risultati non ci rivelano nulla su ciò che fanno le nostre cellule nervose per darci le nostre capacità mentali senza pari; però servono a darci una mappa della strada da seguire per continuare a indagare su di essi.

Tuttavia, per ora non abbiamo altra scelta che ammettere che la nostra mente è assai diversa perfino da quella del primate a noi più vicino e che non sappiamo granché su come si sia prodotta questa differenza. Uno scimpanzè sarebbe in grado di escogitare un esperimento per studiare gli esseri umani? Potrebbe mai immaginare come sarebbe per noi risolvere uno dei loro problemi? No, e ancora no. Benché gli scimpanzè siano in grado di vedere ciò che facciamo, non arrivano a immaginare ciò che pensiamo o sentiamo perché mancano del necessario macchinario cerebrale. Anche se gli scimpanzè e altri animali sembrano capaci di pianificare e di tener conto sia delle esperienze del passato sia delle opzioni del futuro, non c'è alcuna prova che pensino in termini controfattuali, immaginando mondi che sono stati o che avrebbero potuto essere. Noi umani lo facciamo tutto il tempo, e lo abbiamo fatto fin da quando il nostro ben distinto genoma ha dato origine alla nostra ben distinta mente. I nostri sistemi morali hanno per premessa questa capacità mentale.

È possibile che le nostre ineguagliabili menti abbiano raggiunto il limite massimo della potenza? Per ogni forma di espressione umana – comprese le lingue, le composizioni musicali, le norme morali e le forme tecnologiche – ho il sospetto che non siamo in grado di esaurire lo spazio totale delle possibilità. Vi sono significative limitazioni alla nostra capacità di immaginare delle alternative.

Se le nostre menti si trovano di fronte a vincoli intrinseci su ciò che possono concepire, allora il concetto di «pensare fuori dagli schemi» è completamente sbagliato. Siamo sempre dentro uno schema. Come lo scimpanzè non può immaginare che significa essere un uomo, così gli esseri umani non sono in grado di immaginare che significhi essere un alieno intelligente. Per quanto si cerchi di uscirne, siamo bloccati dentro quella scatola chiusa che chiamiamo mente umana. La sola via d'uscita passa attraverso l'evoluzione, il rivoluzionario rimodellamento del nostro genoma in grado di scolpire nuove connessioni nervose e dar vita a nuove strutture neurali. Questo tipo di cambiamento darebbe luogo a una mente di nuovo tipo, che guarderebbe ai suoi antenati come noi guardiamo ai nostri: con rispetto, curiosità e il senso di essere soli, esseri senza pari in un mondo di menti semplici. ■

STATUETTA IN AVORIO ▲

## UTILITÀ LIMITATA

**La documentazione archeologica rivela che intorno a 35.000 anni fa gli esseri umani praticavano abitualmente le arti figurative e costruivano strumenti musicali, il che indica che all'epoca erano ormai dotati del pensiero simbolico. Ma i moderni studiosi non hanno modo di sapere che cosa pensassero dei simboli che ci hanno lasciati quei popoli da tempo scomparsi, o come componessero le loro musiche. Questo tipo di artefatti è dunque di utilità limitata quando si tratta di ricostruire le origini delle nostre esclusive abilità mentali.**

FLAUTO D'OSSO ▼

## ➥ Letture


**Menti morali. Le origini naturali del bene e del male.** Hauser M.D., Il Saggiatore, Milano, 2007.

**The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve?** Hauser M.D., Chomsky N. e Fitch W.T., in «Science», Vol. 298, pp. 1569-1579, 22 novembre 2002.

**Baboon Metaphysics: The Evolution of a Social Mind.** Cheney D.L. e Seyfarth R.M., University of Chicago Press, 2007.

ORIGINI

# IL COMPUTER

di Martin Campbell-Kelly

## L'era dell'informazione è iniziata quando l'uomo ha capito che con le macchine è possibile imitare il potere della mente

Secondo la storia che tutti conosciamo, l'evoluzione dei computer è stata breve e sbrigativa. È iniziata con le enormi macchine della seconda guerra mondiale, che occupavano interi laboratori. Poi i microchip hanno ridotto le dimensioni di queste macchine alle dimensioni dei computer desktop, la legge di Moore ha previsto quanto sarebbero diventati potenti i microchip e la Microsoft ha fatto i soldi con il software. Oggi sono disponibili dispositivi con dimensioni e prezzi ridottissimi, con cui è possibile operare in borsa o mostrare i propri filmati al resto del mondo. Questo è però soltanto uno dei punti di vista sulla storia del computer: la storia dei dispositivi elettronici a stato solido negli ultimi sessant'anni.

In realtà, il calcolo esisteva già molto prima dei transistor. Gli antichi astronomi avevano sviluppato sistemi per prevedere il moto dei corpi celesti. I Greci avevano dedotto forma e dimensioni della Terra. Si calcolavano le tasse e si stabilivano le distanze geografiche. Tuttavia il calcolo era un'attività umana: l'aritmetica era un'abilità che, al pari del saper leggere e scrivere, aiutava una persona a dare un senso al mondo.

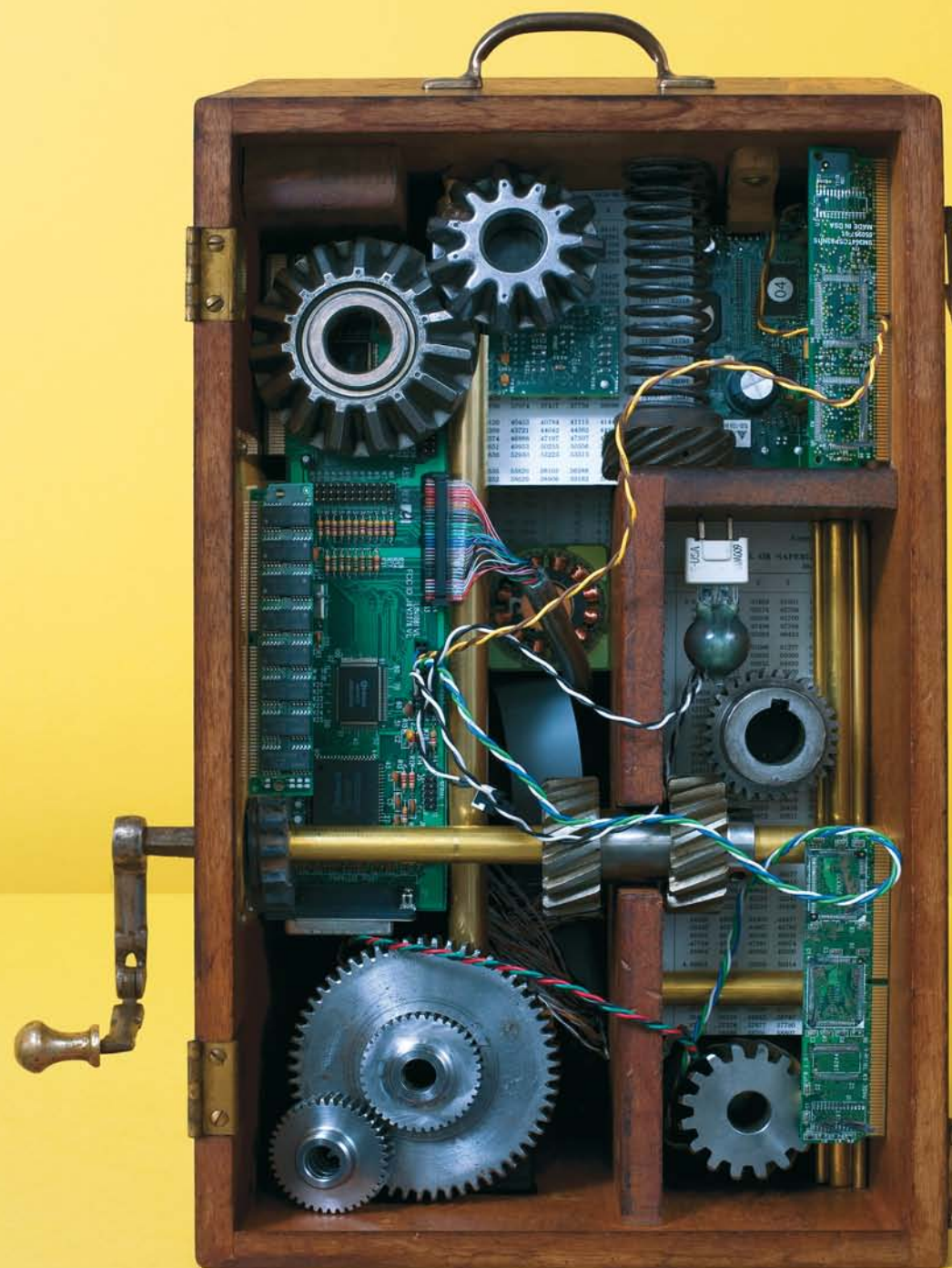
L'era dei calcolatori è iniziata quando questa restrizione è stata abbandonata. Per primi sono arrivati calcolatrici meccaniche e registratori di cassa, ma un punto critico si è avuto anche con l'organizzazione dei calcoli matematici grazie a quelli che oggi chiameremmo «programmi». L'idea di programma è comparsa per la prima volta intorno al 1830, un secolo prima della nascita ufficiale del computer. In seguito, i calcolatori elettronici costruiti durante la seconda guerra mondiale hanno favorito la nascita del concetto di calcolatore universale, ovvero una macchina capace di una qualsiasi elaborazione dell'informazione, anche manipolando i suoi stessi programmi. Questi sono i computer che usiamo oggi. Ma anche se la tecnologia informatica è maturata al punto di essere onnipresente e apparentemente senza limiti, i ricercatori si stanno ispirando alla mente, ai sistemi biologici e alla fisica quantistica per costruire macchine nuove.

### La macchina differenziale

Nel 1790, subito dopo l'inizio della Rivoluzione Francese, Napoleone aveva deciso che la repubblica aveva bisogno di nuove mappe per poter creare un sistema equo di tassazione della proprietà. Napoleone aveva anche ordinato la conversione dal vecchio sistema imperiale di misura al nuovo sistema metrico. Per aiutare ingegneri e matematici, l'istituto cartografico francese aveva quindi commissionato la realizzazione di nuove tavole matematiche: le *Tables du Cadastre*.

Nel XVIII secolo, però, i calcoli venivano fatti a mano. Un gruppo di persone (tra 60 e 80) sommava e sottraeva numeri fino a completare ogni riga delle tavole. Era un la-

**IN SINTESI**

- I primi «computer» erano persone: individui e gruppi di individui che svolgevano a mano i noiosissimi calcoli per riempire le tabelle di tiro dell'artiglieria.
- Ispirato dall'opera delle squadre di calcolatori nella Francia rivoluzionaria, il matematico britannico Charles Babbage ha creato il primo dispositivo meccanico in grado di organizzare i calcoli.
- I primi computer moderni compaiono negli anni cinquanta, quando i ricercatori mettono a punto macchine capaci di usare i risultati dei propri calcoli per modificare le loro stesse istruzioni.

voro semplice, non richiedeva particolari abilità se non sapere leggere e far di conto. Non a caso, molti calcolatori erano parrucchieri che avevano perso il lavoro, vista la scarsa richiesta di tagli aristocratici nella Francia post-rivoluzionaria.

Il progetto richiedeva circa dieci anni per essere completato, ma a causa della guerra la repubblica non aveva i fondi per la pubblicazione del lavoro. Per decenni il manoscritto fu dimenticato all'Académie des Sciences, fino a quando, nel 1819, fu notato da un giovane matematico britannico di nome Charles Babbage, durante un suo viaggio a Parigi. All'epoca Babbage aveva 28 anni e solo tre anni prima era stato eletto membro della Royal Society, la più importante istituzione scientifica del Regno Unito. Conosceva bene il mondo dei «calcolatori umani», avendo più volte coordinato la realizzazione di tavole astronomiche e attuariali.

Al suo ritorno in Inghilterra, Babbage aveva deciso di replicare il progetto francese non con calcolatori umani, ma con una macchina. A quel tempo l'Inghilterra era alle prese con la Rivoluzione Industriale. Lavori che erano sempre stati eseguiti da uomini o animali venivano svolti in maniera più efficiente dalle macchine. Babbage aveva intuito le potenzialità della meccanizzazione e aveva capito che poteva sostituire non solo la forza dei muscoli, ma anche quella della mente.

Nel 1822 aveva proposto la costruzione della sua «macchina calcolatrice», e nel 1824 si era assicurato i finanziamenti del governo. Nei successivi dieci anni si era immerso nel mondo della manifattura, alla ricerca delle tecnologie migliori con cui realizzare la sua invenzione.

Il 1833 è stato l'*annus mirabilis* di Babbage. In quell'anno, infatti, non solo aveva prodotto un modello funzionante della sua macchina calcolatrice (chiamata «macchina differenziale»), ma aveva anche pubblicato il suo classico *Sulla economia delle macchine e delle manifatture*, affermandosi come il più autorevole esperto industriale dell'epoca a livello mondiale. Ogni sabato sera Babbage teneva un incontro nella sua casa di Devonshire Street, a Londra, a cui partecipava la crema della società. Negli incontri il modello della macchina differenziale era esposto come oggetto di conversazione.

Un anno più tardi Babbage abbandonò la macchina differenziale per un progetto ancora più ambizioso: la macchina analitica. Mentre la macchina differenziale era limitata alla compilazione delle tavole matematiche, la macchina analitica avrebbe eseguito qualsiasi tipo di calcolo. Al pari di un moderno computer, la macchina analitica era composta da un processore (detto *mill*, mulino), che eseguiva i calcoli, e da una memoria (detta *store*, magazzino), che immagazzinava i numeri; inoltre dava all'utente la possibilità di immettere nuove istruzioni tramite schede perforate. In breve, era un computer realizzato con tecnologia vittoriana.

La decisione di Babbage di abbandonare la macchina differenziale prima del suo completamento non era piaciuta al governo, che si era rifiutato di fornirgli altri fondi. Senza perdersi d'animo, lo scienziato scrisse migliaia di pagine di appunti e disegni dettagliati della macchina, nella speranza che un giorno il governo avrebbe deciso di finanziarne la costruzione. Ma solo negli anni settanta del XX secolo, in piena era informatica, qualcuno si è occupato per la prima volta di quegli scritti. E come ha notato uno degli studiosi che hanno analizzato i documenti, la macchina analitica sembrava un computer moderno progettato su un altro pianeta.

### La macchina differenziale

**INGRANAGGI INTELLIGENTI. Nel 1832 Charles Babbage produsse un prototipo funzionante della sua macchina differenziale (*a sinistra e, sopra, un dettaglio*) che, pur dimostrando la fattibilità dell'idea, risultò essere troppo piccolo per l'uso pratico. La prima versione completa e funzionante di questa macchina fu costruita solo nel 1991, cioè 158 anni più tardi, dal Science Museum di Londra, basandosi sui dettagliati appunti di Babbage.**

Cortesia Science Museum (*macchina differenziale*); Science Museum/SSPL (*riquadro*)

## L'età buia

La visione di Babbage, in buona sostanza, era il calcolo digitale. Come i dispositivi moderni, infatti, la sua macchina manipolava i numeri (o *digit*) in base a una serie di istruzioni, producendo un risultato numerico preciso.

Eppure, dopo il fallimento di Babbage, il calcolo è entrato a far parte di quello che il matematico inglese L.J. Comrie ha definito l'età buia del calcolo digitale, che si è protratta fino alla seconda guerra mondiale. Durante questo periodo, i calcoli venivano fatti principalmente con i cosiddetti calcolatori analogici, dispositivi che modellizzano un sistema per mezzo di analoghi meccanici. Supponiamo, per esempio, di voler prevedere l'ora di un'eclissi solare. Per farlo in modo digitale, dovremmo risolvere numericamente le leggi di Keplero sul moto dei pianeti. Prima dell'invenzione dei computer digitali, l'unico modo per arrivare a una soluzione era il calcolo manuale. (A questo scopo, tra il 1890 e il 1940 l'osservatorio della Harvard University impiegò un gruppo di donne come calcolatori umani.) Potremmo anche costruire un calcolatore analogico, ossia un modello del sistema solare composto da ingranaggi e leve, che permetterebbe di far scorrere il tempo (*si veda il box a p. 84*) nel futuro.

Prima della seconda guerra mondiale, il più importante strumento di calcolo analogico era l'analizzatore differenziale, sviluppato nel 1929 da Vannevar Bush al Massachusetts Institute of Technology. A quell'epoca gli Stati Uniti stavano facendo grossi investimenti per portare l'elettricità nelle zone rurali e Bush studiava la trasmissione dell'energia elettrica. I problemi si potevano esprimere in equazioni differenziali ordinarie, che però richiedevano molto tempo per essere risolte. L'analizzatore differenziale dava soluzioni approssimative senza fare alcun calcolo. Fisicamente la macchina era piuttosto ingombrante (occupava un laboratorio) e per certi versi somigliava alle macchine dei fumetti di Rube Goldberg, con un gran numero di ingranaggi e alberi rotanti. Per «programmare» la macchina, i ricercatori dovevano collegare i vari componenti con cacciavite, chiave inglese e martello. Nonostante le difficoltà, una volta impostato l'apparato risolveva in pochi minuti equazioni che avrebbero richiesto giorni di calcoli manuali. Ne furono costruite una decina di esemplari, sia negli Stati Uniti sia in Inghilterra.

Uno degli esemplari apparteneva all'Aberdeen Proving Ground, in Maryland, il poligono dell'esercito statunitense responsabile della messa a punto delle armi da impiegare in battaglia. Per puntare l'artiglieria su un bersaglio di distanza nota, i soldati dovevano impostare gli angoli verticale e orizzontale (elevazione e azimut) della canna in modo che il proiettile seguisse la traiettoria parabolica desiderata. Questi angoli venivano selezionati da una tabella di tiro che conteneva numerosi valori, in base a tutte le possibili distanze del bersaglio e alle condizioni operative.

Ogni valore della tabella richiedeva però l'integrazione di un'equazione differenziale ordinaria. Un essere umano avrebbe avuto bisogno da uno a tre giorni per ogni calcolo, mentre con l'analizzatore differenziale bastavano 20 minuti.

## Tutto è cambiamento

Il 7 dicembre 1941 le forze armate del Giappone avevano attaccato la base navale statunitense di Pearl Harbor. E gli Stati Uniti entrarono in guerra. La mobilitazione bellica implicava la necessità di un numero sempre più grande di tabelle di tiro,

### LAVORO DI GRUPPO

**Tra gli anni ottanta del XIX secolo e gli anni venti del XX secolo, le «calcolatrici umane» dell'osservatorio della Harvard University, qui in una foto del 1890 circa, esaminarono centinaia di migliaia di lastre fotografiche, classificando le stelle sulla base di colore, posizione e luminosità.**

**L'AUTORE**

**MARTIN CAMPBELL-KELLY è professore al Dipartimento di informatica dell'Università di Warwick, nel Regno Unito, dove si occupa di storia dei calcolatori. È autore di *Computer: a history of the information machine* (insieme a William Aspray) e *From airline reservations to Sonic the Hedgehog: a history of the software industry*; ha inoltre curato *The collected works of Charles Babbage*.**

Cortesia del curatore delle fotografie astronomiche dell'Harvard College Observatory (*calcolatrici umane*); cortesia Campbell-Kelly (*autore*)

ognuna composta da circa 3000 valori. Nonostante la presenza dell'analizzatore differenziale, il poligono di Aberdeen aveva iniziato ad accumulare una gran quantità di lavoro arretrato.

A 130 chilometri da Aberdeen, all'Università della Pennsylvania, si trovava la Moore School of Electrical Engineering, che aveva un proprio esemplare dell'analizzatore differenziale. Durante la primavera del 1942, un istruttore trentacinquenne della scuola, John W. Mauchly, aveva avuto un'idea su come velocizzare i calcoli: costruire un calcolatore elettronico che impiegasse valvole termoioniche al posto dei componenti meccanici. Mauchly era un teorico e aveva trovato il suo complemento ideale in un giovane ed energico ricercatore, J. Presper Eckert, che aveva già mostrato doti geniali come ingegnere.

Un anno dopo la sua proposta, a seguito di una serie di ritardi accidentali e burocratici, il progetto di Mauchly arrivò sul tavolo del tenente Herman Goldstine. Goldstine, trent'anni e un PhD in matematica all'Università di Chicago, era l'ufficiale incaricato di mantenere le relazioni tra il poligono di Aberdeen e la Moore School. Nel giro di pochi giorni il tenente ricevette il via libera per il progetto e il 9 aprile 1943, giorno del ventitreesimo compleanno di Eckart, iniziò la costruzione dell'Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC).

Molti ingegneri dubitavano del successo dell'ENIAC. Era opinione comune che ciascuna valvola avesse una vita massima di circa 3000 ore e il progetto iniziale prevedeva 5000 valvole. Con un simile tasso di guasti, la macchina avrebbe funzionato solo per qualche minuto prima di essere messa fuori uso dalla rottura di una valvola. Eckert però aveva capito che le valvole tendevano a guastarsi a causa dello stress procurato dall'accensione e dallo spegnimento (per questo motivo le stazioni radio non spegnevano mai i propri trasmettitori a valvole). Inoltre sarebbe stato possibile allungare ulteriormente la vita delle valvole facendole funzionare a una tensione significativamente inferiore rispetto a quella normale. (Il numero totale di valvole sarebbe poi cresciuto fino a 18.000 nella versione finale della macchina.)

Eckert e la sua squadra completarono l'ENIAC in due anni e mezzo, producendo un autentico mostro di ingegneria con un peso di 30 tonnellate e una potenza assorbita di 150 chilowatt. La macchina era in grado di eseguire 5000 addizioni al secondo e di calcolare una traiettoria più velocemente rispetto al tempo impiegato da una granata per raggiungere il suo obiettivo. Si trattava inoltre di un classico caso di *serendipity*: la Moore School non era il centro di ricerca più importante per il calcolo, ma il caso aveva voluto che si trovasse nel posto giusto al momento giusto e con le persone giuste.

Il computer analogico

A RIMIRAR LE STELLE. Un esempio evocativo di computer analogico è il proiettore dei planetari, progettato per riprodurre l'analogo fisico del moto delle stelle e dei pianeti. L'Adler Planetarium di Chicago è stato il primo a installare un macchinario del genere nel lontano 1930 (*a sinistra*). Sebbene i proiettori non siano abbastanza accurati per eseguire calcoli di utilità pratica, ancora oggi i planetari sono in attività. La più recente macchina di questo tipo è visibile presso lo Hayden Planetarium di New York (*sopra*).

Cortesia Adler Planetarium (*proiettore Zeiss*); cortesia D. Finnin, American Museum of Natural History (*riquadro*)

Bettmann/Corbis

POTENZA DEGLI ELETTRONI. Con la costruzione dell'ENIAC, inventato da J. Presper Eckert e J.W. Mauchly alla Moore School of Engineering dell'Università della Pennsylvania, i calcolatori sono entrati nell'era elettronica. Per memorizzare i numeri, l'ENIAC impiegava valvole termoioniche e assorbiva 150 chilowatt di potenza, l'equivalente di oltre 1000 PC moderni.

L'ENIAC venne però terminato solo nel 1945, troppo tardi per contribuire allo sforzo bellico. La macchina aveva capacità limitate, visto che poteva immagazzinare solo 20 numeri alla volta. La programmazione, poi, richiedeva giorni e comportava la manipolazione di una rete di cavi paragonabile a quella di una grossa centrale telefonica. Inoltre la macchina era stata progettata per risolvere equazioni differenziali ordinarie, mentre alcuni progetti (in particolare il Progetto Manhattan) richiedevano la soluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali.

**Agli occhi degli informatici degli anni settanta, la macchina analitica di Charles Babbage sembrava quasi un computer moderno progettato su un altro pianeta**

John von Neumann era un consulente del Progetto Manhattan quando, nell'estate del 1944, apprese dell'ENIAC durante una visita ad Aberdeen. Nato nel 1903 in una famiglia di ricchi banchieri ungheresi, von Neumann si era dimostrato un prodigio della matematica, e aveva terminato la propria formazione in brevissimo tempo. All'età di soli 23 anni era diventato il più giovane *privatdozent* (quasi equivalente al nostro professore associato) dell'Università di Berlino. Nel 1930 era emigrato negli Stati Uniti, dove era diventato, insieme ad Albert Einstein e a Kurt Gödel, uno dei primi docenti dell'Institute for Advanced Studies di Princeton, nel New Jersey. Nel 1937 aveva ottenuto la cittadinanza statunitense.

Von Neumann aveva subito riconosciuto le potenzialità dei calcolatori elettronici, e nei mesi successivi alla visita ad Aberdeen aveva avuto diversi incontri con Eckert, Mauchly, Goldstine e Arthur Burks (altro istruttore della Moore School). In quegli incontri delineò il progetto di quello che sarebbe diventato il successore dell'ENIAC: l'Electronic Discrete Variable Automatic Computer, o EDVAC.

L'EDVAC fu un enorme passo avanti rispetto all'ENIAC. Von Neumann aveva introdotto le idee e la terminologia di Warren McCulloch e di Walter Pitts, neuroscienziati che avevano sviluppato la teoria delle operazioni logiche del cervello (da cui proviene il termine «memoria» nel suo significato informatico). Alla fine degli anni trenta, McCulloch e Pitts, al pari di von Neumann, erano stati influenzati dagli studi teorici del matematico britannico Alan Turing, il quale aveva dimostrato che una macchina semplice può eseguire un'enorme varietà di compiti complessi. In quello stesso periodo si cominciava a percepire il computer non più come uno strumento matematico, ma come una macchina universale per l'elaborazione dell'informazione.

La macchina progettata da von Neumann era composta da cinque parti principali: una «memoria», che conteneva non solo i dati, ma anche le istruzioni per le operazioni; un'«unità aritmetica», che svolgeva i calcoli; un dispositivo di *input*, abilitato all'inserimento dei programmi e dei dati nella memoria; un dispositivo di *output*, che registrava i risultati dei calcoli; e infine un'«unità di controllo», che coordinava le operazioni.

Questa struttura, o architettura, consentiva di cambiare il programma del computer senza dover intervenire fisicamente sulla macchina. Inoltre,

## L'ARCHITETTURA FUTURA DEI COMPUTER

**Dagli anni cinquanta l'architettura *stored-program* è alla base di tutte le tecnologie informatiche. Che cosa ci riserva il futuro?**

**QUANTI:**
Il tanto discusso computer quantistico sfrutta la capacità delle particelle di trovarsi in più stati nello stesso istante. Un calcolo quantistico opera simultaneamente su tutti questi stati possibili della materia.

**RETI NEURALI:**
Questi sistemi sono formati da molti nodi di calcolo semplici collegati tra loro in maniera particolare. Il sistema risultante esibisce un comportamento complesso.

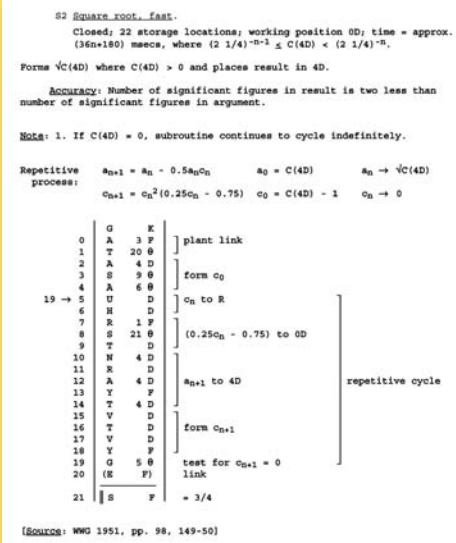
**MATERIA VIVENTE:**
I computer basati su DNA o RNA elaborano i dati codificati su sequenze di materiale genetico.

ogni programma poteva manipolare le sue stesse istruzioni. Questa caratteristica avrebbe permesso a von Neumann non solo di risolvere le equazioni differenziali alle derivate parziali, ma avrebbe anche dato alla macchina quella flessibilità che oggi è alla base di ogni applicazione informatica.

Nel giugno del 1945 von Neumann scrisse, a nome del gruppo, il suo classico *First draft of a report on the EDVAC*. Sebbene si trattasse di un lavoro incompiuto, la sua circolazione negli ambienti scientifici fu immediata ed ebbe due conseguenze: la versione definitiva non venne mai scritta; von Neumann finì per prendersi quasi tutto il merito dell'invenzione.

### L'evoluzione della macchina

La diffusione del computer avvenuta nei successivi sessant'anni è una lunga storia che merita di essere raccontata in un altro articolo. Forse l'elemento da evidenziare è che il computer, inizialmente progettato per eseguire calcoli matematici, si sia poi rivelato adattabile a infiniti usi, dalla gestione dei documenti personali all'elaborazione dei dati in ambito aziendale, per arrivare alla costruzione di una rete informatica globale.

Nello sviluppo del computer possiamo distinguere tre ambiti più specifici: hardware, software e architettura. I progressi fatti nel campo dell'hardware negli ultimi sessant'anni sono ormai leggendari. Dalle ingombranti valvole si è passati, alla fine degli anni cinquanta, ai transistor «discreti», ossia saldati individualmente sul circuito. A metà degli anni sessanta sono arrivati i microcircuiti contenenti diversi transistor su un singolo *chip* di silicio. I transistor sono poi diventati centinaia e poi migliaia, fino ad arrivare al microprocessore, sviluppato all'inizio degli anni settanta e capace di contenere un'intera unità di calcolo su un unico chip. Il microprocessore ha poi portato alla nascita del PC, ed è oggi impiegato in moltissimi campi, dagli impianti di irrigazione ai missili balistici.

I progressi nel campo del software sono stati più sottili. Nel 1947 e nel 1948 von Neumann e Goldstine pubblicarono una serie di articoli intitolati *Planning and coding of problems for an electronic computing instrument*, in cui descrivevano numerose *routine* di calcoli matematici con la speranza che un giorno qualche programmatore le avrebbe convertite in programmi funzionanti. Ma ciò non è mai avvenuto. Il processo di scrittura e messa a punto dei programmi era infatti estremamente difficile. Il primo ad accorgersene fu Maurice Wilkes, l'informatico dell'Università di Cambridge che aveva creato l'EDSAC, il primo computer con architettura *stored-program*, ossia con i programmi registrati in memoria (*si veda il box nella pagina a fronte*). Nel suo *Memoirs of a computer pioneer*, Wilkes, riferendosi al 1949, scrive: «Mi resi conto senza ombra di dubbio che buona parte di quanto mi rimaneva da vivere l'avrei spesa a correggere gli errori nei miei stessi programmi».

Insieme ad altri studiosi di Cambridge, Wilkes aveva sviluppato un metodo per scrivere le istruzioni per il computer in forma simbolica, così da rendere il lavoro più facile e meno soggetto a errori. Il computer avrebbe poi preso quel linguaggio simbolico e lo avrebbe convertito in linguaggio binario. Nel 1957 l'IBM introdusse il linguaggio di programmazione FORTRAN, che semplificava enormemente la scrittura di programmi scientifici e matematici. Nel 1964 John G. Kemeny, insegnante del Dartmouth College, e Thomas E. Kurtz, informatico nello stesso istituto, inventarono il BASIC, un semplice ma efficacissimo linguaggio di programmazione che avrebbe democratizzato l'informatica e l'avrebbe resa accessibile a tutta la popolazione universitaria. Grazie al BASIC, anche gli alunni delle scuole medie e superiori, tra cui un giovane Bill Gates, furono in grado di iniziare a scrivere i propri programmi.

Per quanto riguarda invece il campo dell'architettura (ossia la disposizione logica dei sottosistemi che compongono un computer), non c'è stata praticamente alcuna evoluzione. Quasi tutte le macchine di oggi usano infatti l'architettura stored-program ideata nel lontano 1945. La situazione è analoga a quella delle automobili a benzina: negli ultimi anni ci sono stati molti miglioramenti e l'efficienza è aumentata, ma la struttura di base è rimasta sostanzialmente la stessa. Sebbene sarebbe possibile progettare automobili e computer radicalmente migliori, in entrambi i settori si è raggiunta quella che gli storici della tecnologia definiscono *closure* (chiusura): i guadagni prodotti negli ultimi decenni sono stati così alti che nessuno ha avuto una ragione convincente per investire in tecnologie alternative (*si veda Motore a combustione interna, a p. 111*).

Tuttavia ci sono diverse possibilità per un'evoluzione radicale dei computer. Negli anni ottanta si è registrato un grande interesse per le cosiddette macchine a grande parallelismo, che contenevano migliaia di unità di calcolo operanti simultaneamente. Si tratta della stessa architettura usata ancora oggi per calcoli particolarmente intensivi, come le previsioni del tempo o la ricerca sulle armi atomiche. Gli informatici hanno cercato ispirazione anche nel cervello umano. Sappiamo che il cervello ha centri specializzati per diversi tipi di compiti da svolgere, come per esempio il riconoscimento dei volti o la comprensione del linguaggio. Gli scienziati stanno sfruttando questi concetti per creare «reti neurali» da impiegare nell'identificazione dei veicoli o nel riconoscimento dell'iride.

C'è inoltre molta ricerca di base dedicata alla realizzazione di computer composti da materia vivente, come il DNA (si veda *Arriva il computer a DNA*, di Ehud Shapiro e Yaakov Benenson, in «Le Scienze» n. 457, settembre 2006), e di computer in grado di sfruttare le bizzarrie del mondo dei quanti (si veda *I limiti del computer quantistico*, di Scott Aaronson, in «Le Scienze» n. 477, maggio 2008). Nessuno sa che aspetto avranno i computer fra cinquant'anni, ma non è escluso che le loro capacità supereranno addirittura quelle della mente dei loro creatori. ■

### Il computer stored-program

```
S2 Square root, fast.
    Closed; 22 storage locations; working position 0D; time = approx.
    (36n+180) msecs, where (2 1/4)^-n-1 ≤ C(4D) < (2 1/4)^-n.

Forms √C(4D) where C(4D) > 0 and places result in 4D.

    Accuracy: Number of significant figures in result is two less than
number of significant figures in argument.

Note: 1. If C(4D) = 0, subroutine continues to cycle indefinitely.

Repetitive   a_n+1 = a_n - 0.5a_n c_n         a_0 = C(4D)       a_n → √C(4D)
  process:
             c_n+1 = c_n^2(0.25c_n - 0.75)   c_0 = C(4D) - 1   c_n → 0

          | G      K |
       0  | A    3 F |  ] plant link
       1  | T   20 θ |  ]
       2  | A    4 D |  ]
       3  | S    9 θ |  ] form c_0
       4  | A    6 θ |  ]
 19 →  5  | U      D |  ] c_n to R
       6  | H      D |
       7  | R    1 F |  ]
       8  | S   21 θ |  ] (0.25c_n - 0.75) to 0D
       9  | T      D |  ]
      10  | N    4 D |  ]
      11  | R      D |  ]
      12  | A    4 D |  ] a_n+1 to 4D              repetitive cycle
      13  | Y      F |  ]
      14  | T    4 D |  ]
      15  | V      D |  ]
      16  | T      D |  ] form c_n+1
      17  | V      D |  ]
      18  | Y      F |  ]
      19  | G    5 θ |    test for c_n+1 = 0
      20  | (E     F)|    link
          |----------|
      21  || S     F |    = 3/4

[Source: WWG 1951, pp. 98, 149-50]
```

**CAMBI DI PROGRAMMA. Il primo computer con programmi residenti su una memoria intercambiabile fu l'EDSAC, costruito nel 1949 da Maurice Wilkes e William Renwick all'Università di Cambridge (*a sinistra*). I primi tentativi di creare un linguaggio simbolico (*sopra*) sono stati un'innovazione nella semplificazione della programmazione.**

Popperfoto/Getty Images (*EDSAC*); fonte: *The EDSAC Simulator Program Documentation*, del Dipartimento di informatica dell'Università di Warwick (*riquadro*)

Cortesia Lakeside School

UN GIOCO DA RAGAZZI. Linguaggi semplici come il BASIC hanno contribuito a diffondere la passione per la programmazione. Un giovane Paul Allen (*seduto*) e il suo amico Bill Gates lavorano su una telescrivente collegata a un computer *mainframe* grande quanto una stanza, grazie a una linea telefonica dedicata.

### ➥ Letture


**The Difference Engine: Charles Babbage and the Quest to Build the First Computer.** Swade D., Penguin, 2002.

**Computer: A History of the Information Machine.** Campbell-Kelly M. e Aspray W., Westview Press, 2004.

**The Modern History of Computing.** Stanford Encyclopedia of Philosophy. **http://plato.stanford.edu/entries/computing-history.**

# IL PRINCIPIO DI TUTTE LE COSE

Da dove viene l'arcobaleno? Come sono nati i denti? E chi ha inventato il denaro di carta? All'inizio, c'è sempre la curiosità del bambino, che si trasforma poi nelle domande dello scolaro e, infine, nello schizzo dell'inventore sul retro di una busta da lettera. Ogni cosa ha avuto un principio, e qualcuno ha cercato di capire come e perché. Pensate a questa sezione della rivista come a una serie di domande nate dalla curiosità di un bambino sul mondo che lo circonda e sull'immenso universo che si estende al di là di esso. Dopo aver analizzato, negli articoli precedenti, grandi interrogativi come l'origine dell'universo e l'inizio della vita, ci dedichiamo a qualcosa di diverso. Nelle pagine che seguono si parla dell'origine dell'orecchio esterno e di quella del nastro adesivo, dell'evoluzione dell'amore e dell'invenzione del cuore artificiale. Naturalmente qualcuno vorrebbe sapere che cosa c'era prima del big bang. Ma altri potrebbero avere curiosità un po' più immediate. Continuate a leggere, e scoprirete se è nato prima l'uovo o la gallina.

*La redazione*

## ARCOBALENO

### Una magia multicolore che cela ancora qualche enigma

Il poeta inglese John Keats temeva che una spiegazione scientifica potesse «dissolvere l'arcobaleno»: ossia che, descrivendo razionalmente questo e altri fenomeni, gli scienziati finissero per spogliare il mondo del suo mistero. In realtà, lo studio approfondito dell'arcobaleno non fa che aumentare la nostra ammirazione. La fascia multicolore è solo l'inizio. Guardando con attenzione, all'esterno dell'arco principale c'è una fascia di cielo più scura e poi un secondo arco più debole, con i colori in ordine inverso. E all'interno dell'arco principale se ne distinguono altri di colore verdastro o violaceo, noti come archi soprannumerari. La luminosità dell'arcobaleno può variare nel senso della lunghezza o della larghezza, e all'estremità superiore esso può dividersi in più archi. Inoltre, se lo guardate indossando occhiali da sole con le lenti polarizzate, l'arcobaleno cresce e cala a seconda di come inclinate la testa.

La spiegazione scientifica di base dell'arcobaleno risale al XIV secolo, e si deve al persiano Kamāl al-Dīn al-Fārisī e, indipendentemente, al tedesco Teodorico di Freiberg. Ma gli scienziati hanno continuato ad approfondirne lo studio teorico fino agli anni settanta, e anche oltre (si veda l'articolo *L'arcobaleno*, di H. Moysés Nussenzweig, in «Le Scienze» n. 108, agosto 1977). Molte delle spiegazioni che si trovano nei libri di testo, inoltre, sono sbagliate, e non c'è ancora una descrizione esauriente. «L'arcobaleno ha la fama immeritata di essere un fenomeno spiegabile in modo semplice», afferma Craig Bohren, fisico dell'atmosfera alla Pennsylvania State University. Il principio centrale è che ciascuna gocciolina d'acqua dell'atmosfera si comporta simultaneamente come uno specchio, una lente e un prisma. Le gocce diffondono la luce solare in tutte le direzioni, ma non in maniera uniforme, perché tendono a concentrarla a 138 gradi rispetto alla direzione di incidenza. Le goccioline che formano questo angolo con il Sole appaiono più luminose, e insieme generano un anello. Di solito vediamo solo la metà superiore di questo anello, perché vicino al suolo non ci sono abbastanza goccioline da formare la metà inferiore. «L'arcobaleno non è altro che un'immagine distorta del Sole», scrivono due studiosi dell'atmosfera, Raymond Lee, Jr., e Alistair Fraser, nel loro autorevole libro *The Rainbow Bridge*.

L'angolo di 138 gradi implica che per vedere l'arcobaleno bisogna dare le spalle al Sole. Dato che la luce viene deviata in misura maggiore o minore a seconda della sua lunghezza d'onda, la luce solare bianca risulta suddivisa in bande colorate. Gli archi secondari esterni sono dovuti alle riflessioni multiple entro le goccioline; l'interferenza tra le onde luminose spiega la formazione degli archi soprannumerari; l'appiattimento delle goccioline determina le variazioni di luminosità nell'arco e la variabilità delle loro dimensioni provoca la suddivisione in più archi; infine la luce è polarizzata, esattamente come quella riflessa dalla superficie di uno specchio d'acqua.

Ma anche queste spiegazioni fisiche non ci dicono in che modo gli occhi e il cervello percepiscono lo spettro continuo della luce in forma di colori distinti. L'incanto dell'arcobaleno non si produce solo nel cielo, ma anche nella nostra testa.

*George Musser*

Philip e Karen Smith/Getty Images (*arcobaleno*); Marili Forastieri/Getty Images (*mani*); Getty Images (*auto volante*)

## AUTO VOLANTE

### Un sogno non ancora realizzato

Ah, se la mia auto volasse! Chi non ha mai formulato questo desiderio mentre era imbottigliato nel traffico? Ma quali erano le motivazioni degli inventori che all'inizio del Novecento iniziarono a progettare automobili volanti? All'epoca, la maggior parte dei pionieri dell'aviazione non pensava solo in termini di volo ma di «mobilità personale»; da qui, l'idea di mettere le ali alle automobili, racconta John Brown, direttore della rivista *on line* «Roadable Times». In effetti, osserva, «il vero colpo di genio» dei fratelli Wright – che nel 1903 furono i primi a dimostrare che un veicolo a motore poteva volare in maniera controllata per un tempo significativo – fu proprio la decisione di concentrarsi soltanto sul volo, e di «lasciar perdere la mobilità su ruote».

Naturalmente, con il passare del tempo entrarono in gioco altre motivazioni. Nel giugno 1918, per esempio, un certo Felix Longobardi di Chicago aveva in mente la flessibilità militare. Nella domanda di brevetto che presentò descrisse un marchingegno che era contemporaneamente un'automobile volante, una motovedetta dotata di cannone – «per l'impiego contraereo» – e un sottomarino (come è facile immaginare, non fu mai realizzato). Ancora prima della fine della prima guerra mondiale, Glenn H. Curtiss, leggendario progettista aeronautico, chiese il brevetto per un «autoplano» che concepiva come «veicolo per lo svago». E Moulton B. Taylor, la cui Aerocar fu presentata in tv dall'attore Robert Cummings, scrisse nella domanda di brevetto del 1952 che la sua invenzione doveva essere «in grado di spostarsi sia nell'aria sia su strada e costare abbastanza poco da interessare un mercato potenzialmente ampio».

A oggi, sono decine i brevetti di automobili volanti registrati, e almeno dieci, tra cui un'erede della Aerocar, sono in fase di sviluppo. A Woburn, nel Massachusetts, la Terrafugia sta perfezionando (e accetta prenotazioni, accompagnate da un anticipo di 10.000 dollari) la Transition, che in realtà è un aereo da turismo leggero, non un'automobile per l'uso quotidiano. Tuttavia, dopo l'atterraggio in aeroporto, il pilota potrà ripiegare le ali grazie a un meccanismo elettronico e terminare il viaggio su strada. I test di volo, effettuati lo scorso marzo, sono andati bene, ma resta da vedere se l'invenzione riuscirà davvero a decollare.

*Ricki Rusting*

**LA CONVAIRCAR modello 118, progettata da Theodore P. Hall, effettuò con un test di volo nel 1947, ma poi un grave incidente mise fine alla sua breve carriera.**

## AMORE

### L'evoluzione del sentimento amoroso è legata allo sviluppo di un grande cervello?

Per la maggior parte degli organismi viventi la procreazione è esente da complicazioni emotive. Negli esseri umani, invece, si accompagna a un complice dispettoso: l'amore romantico, in grado di catapultarci al settimo cielo o di gettarci nella disperazione più assoluta. Ma, per quanto capriccioso possa apparire, in realtà è probabile che il sentimento amoroso sia un carattere adattativo, comparso piuttosto presto nell'evoluzione della nostra specie. Secondo una teoria proposta dall'antropologa Helen Fisher della Rutgers University, due dei tratti distintivi dell'evoluzione umana – la deambulazione eretta e il cervello di grandi dimensioni – potrebbero aver favorito la comparsa dell'amore. Il bipedismo comportava per la madre la necessità di reggere tra le braccia il piccolo, anziché trasportarlo aggrappato alla propria schiena. Avendo quindi le mani occupate, la madre aveva bisogno di un partner che la aiutasse a procurarsi il cibo e proteggesse lei e il piccolo.

Gli ominidi bipedi più antichi – come *Australopithecus afarensis*, la specie a cui appartiene Lucy, risalente a 3,2 milioni di anni fa – formavano probabilmente solo legami di coppia temporanei, della durata di qualche anno: il tempo necessario perché il bambino fosse svezzato e in grado di camminare, dopo di che la donna era pronta per una nuova gravidanza.

La comparsa di un cervello voluminoso, avvenuta oltre un milione di anni fa, prolungò la durata di queste relazioni monogame. L'aumento delle dimensioni cerebrali costrinse la specie umana a un compromesso. Il bacino, adattato alla locomozione bipede, pone un limite alla grandezza che può avere il cranio alla nascita. Come conseguenza i neonati umani sono partoriti a uno stadio di sviluppo più precoce rispetto a quelli degli altri primati e hanno un'infanzia molto lunga, durante la quale crescono e imparano. I nostri antenati avrebbero dunque tratto vantaggio dalla formazione di legami di coppia più stabili allo scopo di allevare i piccoli.

Fisher osserva inoltre che l'aumento di dimensioni del cervello degli ominidi (e la nuova organizzazione strutturale che si è accompagnata a questa crescita) fornì ai nostri antenati strumenti straordinari per corteggiarsi a vicenda: la poesia, la musica, l'arte e la danza. La documentazione archeologica indica che 35.000 anni fa questi comportamenti erano già praticati abitualmente. E ciò significa, molto probabilmente, che anche nella preistoria gli esseri umani soffrivano le nostre stesse pene d'amore.

*Kate Wong*

## LETTORE AUDIO DIGITALE

### La musica portatile ha cambiato per sempre l'industria discografica

Nel 1979 il Walkman della Sony, il primo lettore portatile di cassette audio, segnò un deciso progresso rispetto alla radio a transistor perché permise di portare ovunque con sé la musica preferita (si dice che l'ingegner Nobutoshi Kihara abbia inventato l'apparecchio per consentire ad Akio Morita, copresidente della Sony, di ascoltare musica lirica durante i lunghi viaggi in aereo).
Ma la rivoluzione digitale della tecnologia audio personale è avvenuta vent'anni più tardi, e le sue ripercussioni sono andate oltre l'ascolto personale.
La musica portatile è diventata digitale negli anni ottanta, con l'avvento di lettori per CD, minidischi e nastri audio digitali. Negli anni novanta il Moving Picture Experts Group (MPEG), creato dall'International Organization for Standardization per stabilire standard di compressione e trasmissione dei dati audio e video, ha sviluppato il formato MP3 (da MPEG-1 Audio Layer 3), che comprime enormemente i file audio eliminando suoni che superano la capacità di risoluzione uditiva di gran parte delle persone.

Nel 1998 è arrivato sul mercato l'MPMan F10 della Eiger Labs, il primo lettore MP3 con una memoria flash digitale: 32 megabyte, abbastanza per una mezz'ora di musica. Da allora è seguito un diluvio di dispositivi simili, in alcuni dei quali la memoria flash era sostituita da un disco rigido compatto in grado di contenere migliaia di canzoni. Il prodotto più rivoluzionario è stato, nel 2001, l'iPod della Apple. Tecnologicamente non era una novità, ma la combinazione di dimensioni compatte, disco rigido da 5 gigabyte e comandi azionabili con una sola mano ne ha decretato il successo.
Oggi i lettori digitali possono contenere anche fotografie, video e giochi, e sempre più spesso sono incorporati in telefoni cellulari e altri apparecchi elettronici. Gli MP3 – immateriali e facilmente copiabili – hanno liberato la musica dai supporti fisici di vinile o plastica. E dato anche un colpo mortale all'industria discografica, che si è a lungo rifiutata di vendere MP3, con il risultato di favorire la condivisione di file da parte degli appassionati.

Dal 2000 a oggi, secondo la Recording Industry Association of America, i ricavi della vendita di CD sono crollati da 13 a 5 miliardi di dollari, mentre il *download* di musica in formato digitale è passato da 138 milioni di dollari nel 2004 a 1 miliardo nel 2008; tuttavia, spiega Russ Crupnick, analista industriale della NPD Entertainment, gli scambi di file tra privati superano i download autorizzati di almeno dieci a uno. *Christie Nicholson*

## ASTEROIDI

### Il turbolento passato dei piccoli corpi del sistema solare

Molti immaginano gli asteroidi come grandi rocce che vagano minacciosamente nello spazio, offrendo lo scenario ideale per una sparatoria ad armi laser. L'opinione scientifica tradizionale ritiene che siano i resti della formazione dei pianeti, ma la loro storia è ben più complessa e ancora niente affatto chiarita. Gli oggetti che i planetologi raggruppano nella categoria degli asteroidi sono troppo diversi tra loro – da singoli massi a mucchi di pietre «galleggianti» fino a pianeti in miniatura con tracce di una passata attività vulcanica e persino di acqua allo stato liquido – per avere un'origine comune.
Solo gli asteroidi più grandi, di oltre 100 chilometri di diametro, risalgono ai primordi del sistema solare, 4,6 miliardi di anni fa. A quell'epoca il sistema era costituito essenzialmente da un unico grande sciame di asteroidi o, come vengono chiamati in questa fase primordiale, di planetesimi. Come si sia evoluto questo sciame non è noto, ma la teoria più accettata è che la polvere primordiale in orbita intorno al Sole neonato si sia aggregata in corpi di dimensioni via via maggiori. Alcuni di essi si fusero poi a formare i pianeti; altri, accelerati dalla gravità dei corpi più grandi, furono scagliati nello spazio profondo; altri ancora precipitarono nel Sole; e solo pochissimi rimasero dove si trovavano. Questi superstiti stazionano nelle regioni del sistema solare dove l'effetto perturbante dei pianeti si è fatto sentire di meno, in particolare nell'ampio spazio tra le orbite di Marte e di Giove. Tuttavia, un po' alla volta, anch'essi vengono eliminati. Gli asteroidi presenti oggi sono meno di un millesimo, e forse addirittura di un milionesimo, di quelli che in origine popolavano la fascia principale.

Gli asteroidi più piccoli invece non sono relitti del passato, ma materiale di scarto. La grande varietà delle dimensioni indica che si tratta dei prodotti di una serie di collisioni: due asteroidi si scontrano e si frantumano, i loro frammenti si scontrano e si frantumano e così via. Alcuni di essi sono rocciosi, altri hanno una composizione metallica: ciò fa pensare che provengano da strati differenti dell'interno dei corpi originari. Circa un terzo degli asteroidi appartiene a famiglie di oggetti con orbite simili, che possono essere seguite all'indietro nel tempo fino a un unico punto dello spazio, vale a dire il sito della collisione che li generò. Poiché queste famiglie dovrebbero disperdersi in tempi variabili tra 10 e 100 milioni di anni, la formazione di asteroidi tramite collisioni deve essere un processo tuttora attivo.
In effetti, questo è vero anche per la formazione dei pianeti. Ogni volta che un asteroide colpisce un pianeta vi apporta la propria massa. Più che residui della formazione dei pianeti, gli asteroidi ne rappresentano quindi i ritocchi finali. *George Musser*

Cortesia Apple (*iPod*); Photo Researchers, Inc. (*asteroidi*)

## BATTERIA

### Alessandro Volta la inventò, ma non ne comprese in pieno il funzionamento

Quello che permette a una batteria di fornire energia è la tendenza delle cariche elettriche a migrare tra sostanze diverse. È questa l'energia che Alessandro Volta cercò di ottenere quando costruì la prima batteria, alla fine del 1799.
Benché ne esistano diverse varianti, la struttura di base delle batterie è rimasta immutata da allora. Ogni batteria ha due elettrodi. Uno, l'anodo, tende a cedere elettroni (che trasportano una carica elettrica negativa) all'elettrodo opposto, il catodo. Se si collegano gli elettrodi in un circuito, gli elettroni si muovono e producono lavoro: per esempio accendono una lampada o fanno funzionare uno spazzolino elettrico.
Trasferendo semplicemente elettroni da un materiale a un altro, tuttavia, non si va molto lontano: le cariche dello stesso segno si respingono, e dopo che un certo numero di elettroni si è accumulato nel catodo non è possibile aggiungerne altri. Per evitare questo inconveniente, la batteria equilibra le cariche nel proprio interno trasferendo ioni (cariche positive) dall'anodo al catodo attraverso un elettrolita, che può essere solido, liquido o gelatinoso. È l'elettrolita che fa funzionare la batteria, perché consente il flusso di ioni, ma non di elettroni, mentre il circuito esterno trasporta elettroni ma non ioni.
Per esempio, una batteria al litio – come quelle dei telefoni cellulari e dei computer portatili – ha un anodo di grafite contenente atomi di litio e un catodo costituito da un composto a base di litio. Durante il funzionamento, gli atomi di litio dell'anodo cedono elettroni al circuito esterno, lungo il quale questi raggiungono il catodo, più «affamato» di elettroni. Gli atomi di litio, privati dei loro elettroni, diventano ioni con carica positiva e sono attratti dagli elettroni che si accumulano nel catodo. Possono raggiungerli spostandosi attraverso l'elettrolita.
Il moto degli ioni ripristina l'equilibrio di cariche e consente un flusso continuo di corrente elettrica, almeno finché il litio nell'anodo non si esaurisce. Per ricaricare la batteria si inverte il processo: una differenza di potenziale applicata tra i due elettrodi fa sì che gli elettroni (e gli ioni litio) si spostino verso la grafite dell'anodo. Dal punto di vista energetico, è un cammino in salita: è per questo che corrisponde ad accumulare energia nella batteria.
Quando costruì la prima batteria, Volta tentava in realtà di riprodurre gli organi che generano elettricità nelle torpedini, spiega Giuliano Pancaldi, storico della scienza all'Università di Bologna. Presumibilmente seguì un metodo per tentativi ed errori prima di decidere l'impiego di elettrodi metallici e di un elettrolita costituito da cartone bagnato. All'epoca l'esistenza di atomi, ioni ed elettroni era del tutto ignota. Ma, indipendentemente dalla natura dei trasportatori di carica, Volta probabilmente non si rese conto che nella batteria le cariche positive si muovono in senso opposto a quello del «fluido elettrico» all'esterno. «Ci volle un secolo perché gli scienziati chiarissero in maniera definitiva come funziona una batteria», conclude Pancaldi. *Davide Castelvecchi*

Lisa Spindler/Getty Images (*orecchio*); Corbis (*batteria*)

## ORECCHIO ESTERNO

### Nei mammiferi guida i suoni verso l'orecchio medio

Un embrione umano di sei settimane somiglia più che altro a una piccola salamandra: ha minuscole pinne al posto delle mani, chiazze scure in corrispondenza degli occhi e, ai due lati della fessura appena accennata della bocca, cinque o sei piccoli bozzi destinati a formare l'orecchio. A nove settimane, quando la mandibola diventa più pronunciata, queste «collinette» migrano più in alto e cominciano ad assumere la forma concava tanto utile per sostenere gli occhiali.
Poiché lo sviluppo embrionale spesso ripercorre le fasi dell'evoluzione, la crescita simultanea di orecchi e mandibola non è casuale: gli ossicini dell'orecchio medio deputati alla trasmissione del suono, che sono una caratteristica distintiva dei mammiferi, si sono evoluti dagli archi branchiali dei pesci e dalle ossa mandibolari dei rettili. Il timpano, situato all'esterno dell'orecchio medio, si è evoluto indipendentemente e ripetutamente negli antenati degli anuri, delle tartarughe, delle lucertole, degli uccelli e dei mammiferi. Nei rettili il timpano trasmette, in modo grossolano, le vibrazioni di bassa frequenza. I mammiferi, che hanno un orecchio interno più complesso, possono percepire anche suoni di frequenza elevata; si ritiene che le strutture cutanee e cartilaginee esterne, i padiglioni auricolari, si siano evolute per captare e convogliare questi suoni in maniera più efficiente.
L'intera struttura dell'orecchio umano amplifica i suoni solo di 10-15 decibel, ma i padiglioni servono anche a modulare la frequenza dei suoni che entrano nel canale uditivo. Poiché i loro contorni riflettono le vibrazioni in arrivo, i suoni di frequenza molto elevata subiscono un lieve ritardo e sono parzialmente cancellati. Questo effetto di filtro fa sì l'orecchio interno riceva preferenzialmente suoni corrispondenti alla parola umana.
I padiglioni servono anche a individuare la provenienza dei suoni. Forse nessun altro animale ha una capacità di discriminazione direzionale dei suoni più acuta dei pipistrelli, i cui padiglioni hanno forma e dimensione perfettamente adattate alla frequenza delle emissioni sonar di ciascuna specie. Oggi lo studio dei meccanismi con cui i padiglioni auricolari umani filtrano e riflettono i suoni è applicato alla progettazione di protesi acustiche, allo scopo di riprodurre più fedelmente la meccanica naturale dell'udito. Anche i robot e le videocamere automatiche di sorveglianza che si orientano verso suoni sospetti hanno come modelli il capo e l'orecchio esterno umani. *Christine Soares*

## ASSICURAZIONI

### La concezione probabilistica degli eventi è un elemento chiave della modernità

La prima «polizza assicurativa» della storia è contenuta nel Codice di Hammurabi (1780 a.C. circa) e proclama che i commercianti le cui merci venivano perse o rubate durante il viaggio avevano diritto a una risarcimento da parte dello Stato. (Come si dimostrava il proprio diritto? Al re di Babilonia bastava una dichiarazione giurata di fronte agli dei.) Passarono altri 3500 anni prima che una catastrofe – il grande incendio di Londra del 1666 – ispirasse il primo esempio di assicurazione «moderna»: un contratto formale in base a cui il cliente paga un premio a una compagnia di assicurazione, la quale si impegna a versargli una determinata somma in caso di emergenza; l'ammontare del premio è legato al rischio che l'emergenza si verifichi. Questa formula assicurativa fu una conseguenza dei progressi della matematica superiore, e specificamente della teoria delle probabilità. Le sue ricadute sulla nostra vita sono state profonde e durature, influenzando il nostro modo di concepire molte cose, compresi noi stessi.

La teoria matematica delle probabilità nacque a metà del XVI secolo, quando si cominciarono ad analizzare i giochi d'azzardo. L'obiettivo era mettere ordine nella casualità. Si comprese che le tempeste più violente, le pestilenze e altre avversità non erano prodigi, ma semplicemente eventi naturali (e rari): non flagelli da temere, ma misteri da risolvere. Fu così che il calcolo delle probabilità entrò nella scienza moderna.

I genetisti lo usano per determinare la probabilità che da una coppia di genitori nasca un figlio con un certo difetto congenito. I fisici delle particelle se ne servono per frenare i timori che il nuovo supercollisore produca un buco nero capace di inghiottire la Terra. Noi organizziamo la nostra vita, dai piaceri ai doveri, tenendo presente la scadenza probabilistica della sua durata. In ogni circostanza, intuiamo in maniera subconscia l'esito probabile di una certa azione, ma queste intuizioni sono flessibili. È la verifica del mondo reale – il metodo scientifico – a confermare o smentire le nostre idee.

Ma il calcolo dei rischi dell'industria assicurativa ha avuto anche conseguenze negative: se ne trovano i segni nei recenti crolli delle Borse mondiali. Una formula pubblicata nel 2000 da David X. Li, che in seguito è diventato responsabile della divisione ricerche di Citigroup e Barclays Capital, e che è stata ampiamente utilizzata da economisti e banchieri per stimare il rischio associato alle ABS (*asset-backed security,* un particolare tipo di obbligazione), includeva una componente chiave presa a prestito dalle assicurazioni sulla vita. La formula, chiamata funzione a cupola gaussiana, era purtroppo un'applicazione erronea della scienza attuariale. Come si è poi dovuto constatare, il rischio associato agli strumenti finanziari non è prevedibile allo stesso modo, diciamo, del rischio di morte del coniuge. *Bruce Grierson*

**IL CODICE DI HAMMURABI, inciso su una lastra di basalto nero intorno al 1780 a.C. e conservato oggi al Museo del Louvre, contiene la più antica «polizza assicurativa».**

## NASTRO ADESIVO

### Ci sono invenzioni da cui sembra impossibile staccarsi…

Negli anni trenta le industrie alimentari si innamorarono di un tipo di pellicola relativamente nuovo e avanzato chiamato cellophane, un polimero trasparente derivato dalla cellulosa. Le confezioni in cellophane preservavano la freschezza dei cibi e nello stesso tempo consentivano agli acquirenti di vedere il prodotto. Tuttavia, chiudere in maniera soddisfacente i pacchetti in cellophane era un problema: almeno finché la 3M non ha inventato e brevettato il nastro Scotch, il cui nome è divenuto così noto da essere poi usato per indicare tutti i tipi di nastro adesivo.

La colla usata nello Scotch è un cosiddetto PSA (*pressure-sensitive adhesive,* adesivo sensibile alla pressione). Come spiega Alphonsus Pocius, del 3M Corporate Research Materials Laboratory di St. Paul (nel Minnesota), non agisce formando legami chimici con il materiale su cui viene posta, ma l'applicazione di una pressione la fa penetrare anche nelle più microscopiche irregolarità della superficie. Una volta fissata, resiste al distacco, mantenendo il nastro fermo al suo posto.

La colla «deve avere una consistenza intermedia tra un liquido e un solido» continua Pocius: abbastanza fluida da espandersi se sottoposta a pressione, ma sufficientemente viscosa da non scivolare.

Trovare la colla giusta, però, è solo una parte dell'invenzione. Un tipico nastro adesivo non contiene due materiali (la colla e la base, che può essere di cellophane o di un'altra materia plastica), ma quattro. Uno strato di preparazione su una faccia della base favorisce la buona adesione della colla alla plastica, mentre la faccia opposta è rivestita da un «distaccante», per far sì che la colla non vi aderisca. In caso contrario, sarebbe impossibile svolgere un rotolo di Scotch.

Recentemente il nastro adesivo ha richiamato l'attenzione dei fisici. Alcuni ricercatori infatti hanno dimostrato che svolgere un rotolo di nastro in una camera a vuoto produce raggi X, che hanno usato a scopo dimostrativo per ottenere una radiografia delle ossa delle loro dita. Questa scoperta potrebbe permettere di realizzare apparecchi per radiografie poco costosi e portatili (e addirittura azionati dalla forza muscolare). Il processo di srotolamento crea cariche elettrostatiche, e gli elettroni costretti a scavalcare lo spazio sempre più ampio tra i due segmenti di nastro generano raggi X. Nell'aria gli elettroni sono assai più lenti, e quindi non si producono raggi X; ma, se il nastro viene srotolato in una stanza completamente buia si osserva una debole luminescenza. *Davide Castelvecchi*

Jaunty Junto/Getty Images (*nastro adesivo*); Granger Collection (*Codice di Hammurabi*)

## ANTIBIOTICI

### Queste prodigiose molecole potrebbero essersi evolute per aiutare i batteri a comunicare con i loro vicini

La maggior parte degli antibiotici di interesse medico deriva da batteri del suolo. Secondo la teoria convenzionale, i microrganismi hanno evoluto questi composti come armi letali nella feroce lotta per il cibo e il territorio che si combatte sotto i nostri piedi. Ma da oltre 15 anni il microbiologo Julian Davies dell'Università della British Columbia sostiene il contrario. «Stanno parlando, non combattendo» afferma. La sua teoria, rispettata anche se non accettata da tutti, è che i batteri usano la maggior parte delle piccole molecole che noi chiamiamo antibiotici per comunicare.

A dimostrazione di ciò, Davies osserva che in natura i batteri del suolo producono antibiotici in quantità così ridotte che non possono in alcun modo uccidere i loro vicini microbici. «Solo quando le impieghiamo in concentrazioni innaturalmente elevate vediamo che queste molecole inibiscono i batteri» spiega. Per di più i collaboratori di Davies hanno evidenziato una frenetica attività genica in batteri esposti a basse dosi di antibiotici. I ricercatori hanno introdotto nei microrganismi dei geni *lux*, che producono un segnale di fluorescenza quando altri geni a essi collegati sono attivi; poi hanno osservato questi «commutatori» genetici che si accendono in un coro di risposte dopo l'esposizione ad antibiotici.

Questa attività di chiamata e risposta è simile a quella delle cellule che reagiscono agli ormoni, osserva Davies, o dei batteri che usano il *quorum sensing* (un sistema di comunicazione tra batteri della stessa specie, *N.d.R.*) per valutare l'entità della loro popolazione. «Può darsi che alcune di queste sostanze siano usate come armi in natura – continua Davies – ma non è ciò che osserviamo». Fa anche notare che un grammo di suolo contiene batteri di oltre 1000 specie diverse. «Prosperano tutti insieme, e certo non si uccidono a vicenda». Ipotizza dunque che la funzione di molti antibiotici consista nel coordinare attività batteriche quali la formazione di sciami, la produzione di biofilm e vari tipi di interazioni con i loro ospiti pluricellulari.

La sua teoria ha conseguenze sia positive sia negative per la medicina. Le comunità batteriche (non solo quelle del suolo) potrebbero contenere un patrimonio ricchissimo di sostanze potenzialmente in grado di uccidere microrganismi. Davies e colleghi hanno già individuato alcune molecole candidate in batteri intestinali come *Escherichia coli.* Ma per ogni nuovo antibiotico potrebbero già esistere molti geni di resistenza corrispondenti. In fondo, gli stessi batteri che producono regolarmente antibiotici e reagiscono a essi hanno bisogno di meccanismi che li proteggano da possibili effetti tossici. E nel mondo dei batteri, dove lo scambio genico è frequente, non occorre molto tempo perché le istruzioni contenute nel DNA si diffondano da una specie ad altre, ogni volta che un nuovo antibiotico comincia a trovare ampio impiego clinico. *Jessica Snyder Sachs*

## CUORE ARTIFICIALE

### Un dispositivo salvavita il cui merito va a centinaia di ricercatori

Nel gennaio 1982 un team di chirurghi dell'Università dello Utah impiantò il primo cuore artificiale permanente a Barney Clark, sessantunenne dentista di Seattle, che sopravvisse all'operazione per 112 giorni. L'intervento fu un trionfo per Willem Kolff, fondatore della Division of Artificial Organs dell'Università, e direttore del team che realizzò il cuore nuovo di Clark. Nelle settimane successive, però, mentre la stampa di tutto il mondo seguiva freneticamente l'evoluzione dello stato di salute di Clark, il ruolo di Kolff iniziò a passare in secondo piano; oggi, dopo quasi trent'anni, è praticamente dimenticato: forse avrebbe dovuto battezzare l'apparecchio con il proprio nome.

Kolff era già uno dei massimi esperti mondiali nella ricerca sugli organi artificiali quando, nel 1967, si trasferì dalla Cleveland Clinic allo Utah: dieci anni prima aveva inventato il primo rene artificiale funzionante. All'Università dello Utah Kolff dirigeva un gruppo di oltre 200 medici e scienziati impegnati nello sviluppo del settore degli organi artificiali; nel 1971 assunse Robert Jarvik, un giovane ricercatore di biomeccanica con un particolare interesse per la progettazione. L'anno successivo Jarvik si iscrisse alla Facoltà di medicina e continuò a dedicarsi al perfezionamento del cuore artificiale fino alla laurea, nel 1976.

Kolff aveva l'abitudine di dare ai nuovi modelli di cuore il nome di giovani ricercatori del suo laboratorio, per accrescerne la motivazione e far sì che non si trasferissero altrove. Jarvik era responsabile di progetto per la versione che venne denominata Jarvik-7, e che nel 1981 ottenne dalla Food and Drug Administration l'autorizzazione a essere usata sull'uomo. Quando Clark ricevette il cuore che portava il suo nome Jarvik aveva 35 anni. Prese parte alla conferenza stampa in cui venne data la notizia dell'intervento, benché non vi avesse partecipato di persona, e continuò ad apparire nei successivi incontri con i giornalisti, mentre Kolff manteneva un basso profilo.

Non è sorprendente, dunque, che un dispositivo di questa importanza – il merito del quale va in realtà alle centinaia di ricercatori che ci hanno lavorato per anni – sia stato associato dall'opinione pubblica a un solo uomo: dopo tutto, ne portava il nome. *Michael Moyer*

Hank Morgan/Photo Researchers, Inc.

## EFFETTO CORIOLIS

### Influenza gli uragani, ma non gli scarichi

Nell'ultimo anno della prima guerra mondiale, quando l'esercito tedesco puntò i suoi cannoni più potenti su Parigi da una distanza di 120 chilometri, i soldati dovettero correggere le traiettorie tenendo conto di molti fattori che, con armi più deboli, potevano essere ignorati. Uno di questi era la forza di Coriolis, una lieve perturbazione dovuta alla rotazione terrestre che, in quelle condizioni, avrebbe deviato i proiettili di circa 800 metri.

Lo scienziato parigino Gaspard-Gustave de Coriolis aveva introdotto le equazioni che descrivono questo effetto in un lavoro del 1835 che analizzava macchine con parti rotanti, come i mulini ad acqua. L'effetto Coriolis può manifestarsi in qualunque situazione in cui si abbia una rotazione. Per esempio se state in piedi su una giostra che ruota in senso antiorario e lanciate una palla in qualsiasi direzione, la vedrete curvare verso destra. Per un osservatore situato a terra la palla si muove in linea retta rispetto al suolo, ma nel sistema di riferimento in rotazione della giostra la direzione di moto della palla devia in senso orario. Apparentemente, su di essa agisce una nuova forza.

La rotazione terrestre produce una forza analoga, anche se molto più debole. Oltre a deviare le traiettorie di proiettili e missili a lunga gittata, l'effetto Coriolis fa sì che i cicloni (compresi uragani e tifoni) ruotino in senso orario a sud dell'equatore e antiorario a nord. Anzi, l'effetto Coriolis è il motivo per cui i venti tendono a muoversi *intorno* alle regioni di alta e di bassa pressione, parallelamente alle linee di pressione costante (isobare) delle carte meteorologiche, anziché soffiare direttamente dalle zone di pressione più elevata a quelle di pressione più bassa perpendicolarmente alle isobare. Nell'emisfero settentrionale l'aria che scorre verso una regione di bassa pressione in senso radiale rispetto alle isobare viene deviata verso destra. Il moto raggiunge uno stato stazionario quando i venti circondano il minimo di pressione: il gradiente barico li spinge verso l'interno e la forza di Coriolis verso l'esterno.

Un mito da sfatare è quello secondo cui l'acqua che scende in uno scarico ruoti in direzioni opposte nei due emisferi. Non è vero: benché la forza di Coriolis sia abbastanza intensa da modificare la direzione dei venti degli uragani quando agisce su di essi per estensioni di centinaia di chilometri nell'arco di diversi giorni, è di gran lunga troppo debole per modificare il moto di qualche litro d'acqua nei pochi secondi che occorrono per scendere nello scarico. *Graham P. Collins*

**UN MISSILE TITAN II**, con una portata di oltre 11.000 chilometri, verrebbe deviato di molte centinaia di chilometri dalla forza di Coriolis.

## CUSCINETTI A SFERA

### L'idea risale addirittura agli Egizi, ma ci volle l'acciaio a basso costo perché si affermasse pienamente

Se l'utilità di un'invenzione fosse proporzionale al genio del suo ideatore, si potrebbe capire perché tante fonti fanno risalire l'idea dei cuscinetti a sfera a un disegno di Leonardo da Vinci del 1497. Ma le buone idee, così come i caratteri evolutivi utili, tendono ad apparire ripetutamente in luoghi e tempi diversi, e quella di realizzare parti che rotolano l'una rispetto all'altra, invece di scorrere, è davvero antica.

In termini generali era già nota agli antichi Egizi, che per spostare grandi blocchi di pietra si servivano di cilindri rotolanti. Una tecnica simile fu sfruttata dai costruttori di Stonehenge, nel 1800 a.C. circa, e dagli artigiani che, intorno al 100 a.C., realizzarono cuscinetti cilindrici per i mozzi delle ruote dei carri. (In questi veicoli l'asse girava con le ruote, cosicché i cuscinetti gli permettevano di rotolare in senso opposto al telaio del carro.)

Il primo progetto di cuscinetto a sfera che sosteneva l'asse di un carro apparve solo nel 1794, in un brevetto concesso al fabbro gallese Philip Vaughan. Cuscinetti a sfera tra la ruota e l'asse consentivano di fissare quest'ultimo al telaio del veicolo. Ma i cuscinetti in ferro fuso erano fragili, e tendevano a spaccarsi. Si dovette attendere l'invenzione del processo Bessemer per produrre acciaio a basso costo, nonché quella della bicicletta, perché l'idea si affermasse definitivamente.

Jules-Pierre Suriray, meccanico di Parigi, brevettò il suo progetto di cuscinetto a sfera in acciaio nel 1869, e nello stesso anno una bicicletta che montava il dispositivo di Suriray vinse una gara ciclistica internazionale.

La richiesta di cuscinetti a sfera – per automobili, carri armati o sistemi di guida – ha spinto i fabbricanti a cercare di avvicinarsi sempre più all'ideale di una sfera perfetta. Una ruota non può girare a lungo sul proprio asse senza cuscinetti a sfera prodotti con una tolleranza inferiore a 0,0025 o addirittura 0,00025 centimetri.

Secondo molte fonti, le sfere migliori sono quelle impiegate nelle sospensioni dei dischi rigidi dei computer, ma in realtà questo onore spetta alle sfere di quarzo fuso grandi quanto una pallina da ping pong utilizzate come sospensioni giroscopiche nel satellite Gravity Probe B. I suoi giroscopi sono 30 milioni di volte più precisi dei migliori fra quelli costruiti in precedenza. *Peter Brown*

Michael Dunning/Corbis (*missile*); Wolfram Schroll/Corbis (*cuscinetto a sfera*)

## DENTI

### Sono molto più antichi del sorriso

I paleontologi si sono chiesto a lungo se i primi denti si trovassero all'esterno o all'interno del corpo degli animali preistorici. Gli squali sono ricoperti da migliaia di minuscoli denticoli: protuberanze di dentina e collagene, che rendono ruvida la loro pelle. Se i denticoli di un vertebrato molto primitivo, si ipotizzava, fossero migrati sulla mandibola, si fossero ingranditi e avessero assunto nuove funzioni, avrebbero forse dato origine alla dentatura attuale.

Ma nell'ultimo decennio i fossili e la genetica hanno confermato che i denti sono apparsi molto tempo prima degli squali più antichi; hanno addirittura preceduto la mandibola e i denticoli. E hanno avuto origine nell'interno del corpo, ma non nella bocca. La prima dentatura appartiene ad animali nuotatori simili ad anguille, vissuti circa 525 milioni di anni fa e lunghi tra 4 e 40 centimetri, detti conodonti a causa dell'anello di lunghi denti di forma conica situato nella faringe.

Alcune specie di pesci hanno tuttora un gruppo di denti vestigiali a livello faringeo, ma si ritiene che quei denti siano per lo più migrati in avanti, nella bocca, forse in concomitanza con l'evoluzione della mandibola. A sostegno di questa ipotesi, l'attività genica programmata che porta alla formazione dei denti è distinta dalle istruzioni per la costruzione della mandibola, anche se le due strutture crescono in tandem durante lo sviluppo embrionale.

È probabile però che il connubio tra denti e mandibola abbia dato origine alle forme specializzate dei denti. Lo scambio di segnali molecolari che dà inizio alla formazione dei denti è evidenziabile già a partire dal decimo giorno di sviluppo dell'embrione umano. Nello stesso tempo, segnali provenienti dalla mandibola impartiscono al dente primordiale una forma che non può più essere alterata: se si trapiantasse la gemma di un futuro molare in un'area diversa della mandibola, si svilupperebbe mantenendo la specifica forma a cui lo destinava la sua posizione originaria.

Purtroppo è molto difficile riassumere mezzo miliardo di anni di evoluzione in laboratorio. Poiché la formazione dei denti dipende da segnali provenienti dalla mandibola embrionale in via di sviluppo, le ricerche che hanno come obiettivo la crescita di denti di ricambio a partire da cellule staminali si concentrano nell'indurne la formazione nella posizione appropriata della bocca; ma non è ancora certo che la mandibola adulta sia in grado di inviare i segnali necessari per generare denti su misura. *Christine Soares*

## UOVO

### La risposta al celebre quesito è biologicamente scontata

Nel marzo 2006, in occasione dell'uscita in DVD del cartone animato *Chicken Little*, la Disney convocò un gruppo di esperti per risolvere definitivamente l'antica domanda: è nato prima l'uovo o la gallina? Il verdetto fu unanime. «La prima gallina deve essersi differenziata dai suoi genitori a seguito di una variazione genetica grazie a cui quell'uccello fu il primo a soddisfare la nostra definizione di gallina», spiegò il biologo evoluzionista John Brookfield. «Perciò l'organismo vivente all'interno del guscio avrebbe avuto lo stesso DNA della gallina che sarebbe diventato, quindi sarebbe appartenuto anch'esso alla specie della gallina». Ciò che riconosciamo come il DNA di una gallina comincia a esistere dentro un uovo, perciò è nato prima l'uovo.

Eppure la domanda è incompleta, se non fuorviante. Se per «gallina» intendiamo un membro della sottospecie *Gallus gallus domesticus* (evolutasi nelle giungle del Sudest asiatico e probabilmente domesticata circa 10.000 anni fa), possiamo chiederci in quale momento apparve il primo membro di questa specie (e se era un uccello o un uovo). Ma la speciazione non è un processo che avviene in un istante, né in un singolo individuo. Occorrono generazioni dopo generazioni di cambiamenti graduali perché un gruppo di animali smetta di potersi incrociare con un altro gruppo; solo a quel punto possiamo dire che la speciazione è avvenuta.

Da questa prospettiva, non ha senso parlare di prima gallina o primo uovo. Ci fu solo il primo gruppo di galline: alcune delle quali, presumibilmente, sotto forma di uovo. Se poi si abbandona il criterio della specie, l'uovo stravince. Anche invertebrati semplici come le spugne si affidano a un uovo per riprodursi, il che significa che le uova probabilmente precedono l'esplosione di biodiversità del Cambriano, 530 milioni di anni fa. Pesci e anfibi depongono uova gelatinose, e gli antenati di rettili e uccelli cominciarono a deporre uova dotate di guscio circa 340 milioni di anni fa: un'innovazione che permise alle loro uova di sopravvivere anche in ambienti non acquatici, aprendo la strada allo sviluppo dei vertebrati terrestri molto tempo prima che il primo gallo cantasse. *Michael Moyer*

GK e Vikki Hart/Getty Images

## CANCRO

### Quando cedono i meccanismi cellulari di controllo

La pluricellularità ha i suoi vantaggi, che si associano però a un prezzo da pagare. La divisione del lavoro in un organismo complesso implica che ogni cellula debba svolgere il suo compito, e solo quello; perciò si è evoluto un elaborato sistema di regolazione che sorveglia le cellule. Quasi tutti i 1000 miliardi di cellule del corpo umano, per esempio, contengono una copia completa del genoma: le istruzioni per la costruzione e il mantenimento del nostro organismo. Rigidi meccanismi che controllano quali geni vengono attivati, e quando, in ogni data cellula determinano il comportamento e l'identità di quella cellula.

Una cellula sana della cute esegue solo gli ordini genetici necessari per svolgere il proprio ruolo nel tessuto in cui risiede. Rispetta i confini delle cellule circostanti e i segnali da esse prodotti e, quando il sistema di regolazione lo permette, si divide per generare nuove cellule, ma solo nel numero necessario per riparare una ferita, mai di più.

Il medico greco Ippocrate fu il primo, nel IV secolo a.C., a usare il termine *karkinos*, ossia «granchio», per descrivere i tumori maligni, perché le loro espansioni ramificate nei tessuti circostanti e gli ricordavano gli arti di quel crostaceo. In latino il termine per indicare il granchio era *cancer*, e nel II secolo a.C. il grande medico romano Galeno sapeva che quelle protrusioni di aspetto spinoso erano un segnale dell'avvenuta perdita di controllo sui tessuti normali dell'organismo. Egli attribuiva la disfunzione a un eccesso di bile nera. Gli scienziati moderni ritengono che i tratti caratteristici del cancro – proliferazione incontrollata, invasione dei tessuti circostanti e formazione di metastasi in sedi distanti – siano da imputare al cedimento del sistema regolatorio cellulare.

Le proteine e gli acidi nucleici che controllano l'attività genica sono a loro volta codificati da geni; di conseguenza il cancro trae origine da mutazioni che inibiscono geni chiave o, viceversa, li iperattivano. Queste alterazioni danno inizio a tutta una serie di squilibri che compromettono i processi regolatori a valle, e presto la cellula si avvia verso la malignità.

Finora i tentativi di identificare esattamente la combinazione di mutazioni necessarie per dare origine a un particolare tipo di cancro – del cervello, della mammella o di altre sedi – non hanno fornito indicazioni univoche. Quando una rete regolatoria è destabilizzata, può funzionare male in modi altrettanto diversi e complessi delle vie molecolari che controlla in condizioni normali; ciò implica che ogni caso di cancro abbia un'origine del tutto peculiare. Nonostante il loro caos interno, tuttavia, le cellule tumorali hanno alcune caratteristiche in comune con le staminali: infatti anche queste cellule indifferenziate deputate alla costruzione dell'organismo sono libere da molti dei vincoli imposti alle cellule normali. Ma nelle staminali l'enorme potenzialità del genoma è sotto controllo; nel cancro si scatena. *Christine Soares*

## PLACCHE TETTONICHE

### Il lungo e strano viaggio della deriva dei continenti

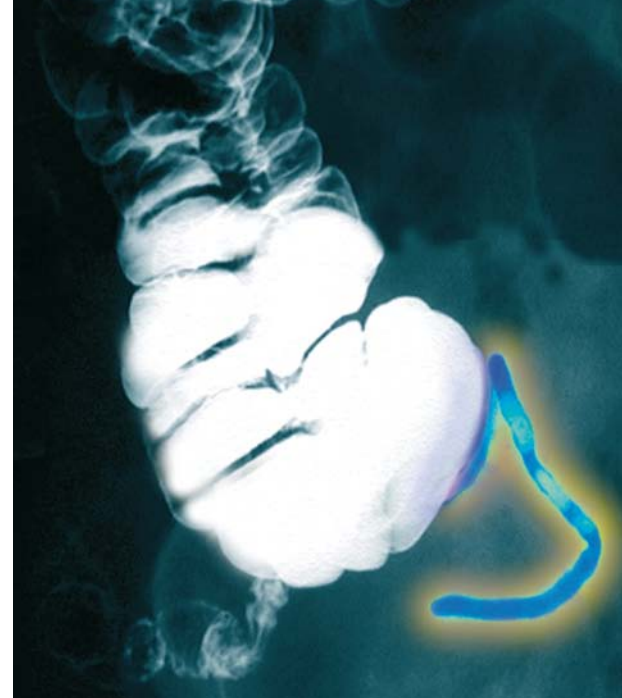
L'idea della deriva dei continenti formulata da Alfred Wegener rimase sospesa nel vuoto nei primi decenni che seguirono la pubblicazione del suo libro *La formazione dei continenti e degli oceani*, nel 1915. Anche se alcuni geologi raccolsero ulteriori prove a sostegno della sua teoria, i più rimasero scettici, perché non sembrava esistere alcun meccanismo plausibile in grado di spingere enormi masse continentali a farsi faticosamente strada attraverso la crosta oceanica, compiendo lunghi viaggi sulla superficie terrestre.

Il moderno concetto delle placche tettoniche in movimento emerse nel 1962, proposto da Harry H. Hess della Princeton University. Durante la seconda guerra mondiale, Hess era stato comandante di una nave da carico della marina statunitense e aveva usato il sonar dell'imbarcazione per mappare il fondo del Pacifico durante i suoi viaggi. Secondo la sua ipotesi, tutta la crosta terrestre, sia oceanica sia continentale, è mobile, alimentata da movimenti convettivi nello strato sottostante, il mantello. Nuova crosta si forma in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche, dove il magma caldo proveniente dal mantello si solleva e si cristallizza. La giovane crosta si espande dalle dorsali e la vecchia crosta sprofonda nelle profonde fosse oceaniche. In questo modo la crosta e la porzione superficiale e solida del mantello superiore (note insieme come litosfera) si suddividono in placche in movimento.

Le idee di Hess furono accettate dopo che gli studi accertarono che il magnetismo delle rocce sul fondo oceanico rispondeva alle previsioni: il campo magnetico terrestre, che sporadicamente inverte la polarità, lascia una traccia nelle rocce in fase di solidificazione, generando bande con magnetismo alternante parallele alle dorsali oceaniche.

La deriva dei continenti affonda quindi le sue radici nell'immenso calore che proviene dall'interno del pianeta. Il decadimento radioattivo continua ancora a produrre quel calore. Tuttavia gli scienziati stimano che tre miliardi di anni fa stesse emergendo il doppio della quantità attuale di calore, che generò numerosi punti caldi (*hotspot*) dove il magma saliva in superficie, frammentando la giovane litosfera in molte piccole placche tettoniche. Forse i primi continenti non erano molto più grandi dell'Islanda (*sotto*), e forse le somigliavano anche per altri aspetti: per 16 milioni di anni o giù di lì, l'Islanda ha continuato a formarsi in corrispondenza di un punto caldo sulla dorsale medio-atlantica. *Graham P. Collins*

Getty Images

Scott Camazine/Photo Researchers, Inc. (*appendice*); Getty Images (*rilievo*)

## APPENDICE

### Non è necessaria, ma nemmeno inutile

Qualcuno ha ipotizzato che esista per dare lavoro ai chirurghi. Leonardo da Vinci pensava fosse una specie di via di fuga per «l'eccesso di vento», che serviva a preveniva lo scoppio dell'intestino. Il grande artista e anatomista non era completamente fuori strada, nel senso che l'appendice umana sembra effettivamente aver avuto origine in un'epoca in cui i primati si nutrivano solo di vegetali, e tutta quella fibra non era facile da digerire.

La protuberanza intestinale formalmente nota come «appendice vermiforme» è una cavità lunga e sottile, chiusa in punta. Si dirama dall'intestino cieco, che è di per sé una grande sacca all'inizio del grande intestino che riceve il cibo parzialmente digerito proveniente dall'intestino tenue. Mentre il cibo staziona nel fondo del cieco, i microbi intestinali contribuiscono alla sua ulteriore decomposizione.

Alcuni animali erbivori moderni, come conigli e koala, hanno una grande appendice, contenente batteri specializzati nella digestione della cellulosa. Moltissimi mammiferi erbivori, comprese alcune scimmie, ne sono invece completamente privi, perché hanno un intestino cieco più grande che si occupa della decomposizione dei vegetali. Poiché l'appendice sembra essere superflua persino tra i primati, i biologi non possono semplicemente inferire che la nostra sia un residuo ereditato da un comune antenato con il coniglio. L'appendice dei primati e quella di altri mammiferi erbivori sembrano invece essersi evolute in maniera indipendente quali estensioni del cieco, forse per la stessa funzione digestiva, che tuttavia l'appendice umana ha perso da tempo.

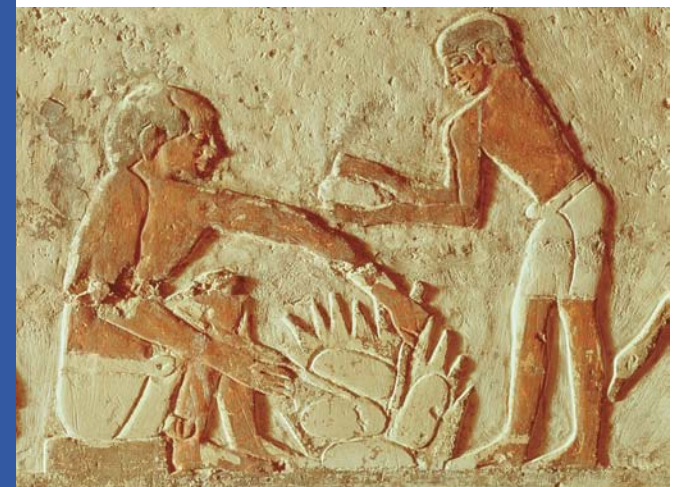
L'aver servito da deposito per il cibo e batteri digestivi benigni, tuttavia, potrebbe aver generato una funzione secondaria per l'appendice, almeno nella primissima infanzia. Il suo rivestimento interno è ricco di cellule immuni che controllano l'ambiente intestinale. Nelle prime settimane di vita, l'intestino umano viene popolato per la prima volta da una normale e sana quantità di microrganismi simbiotici; l'appendice potrebbe fungere da centro di addestramento in cui le inesperte cellule immuni imparano a identificare i patogeni e a tollerare i microbi innocui. Se non è rimossa prima, l'apertura della cavità appendicea si chiude completamente intorno ai cinquant'anni. Ma a quel punto è probabile che abbia già svolto la sua funzione. *Christine Soares*

## COTTURA

### La preparazione dei cibi con il fuoco ha contribuito a renderci umani

In un mondo senza cottura dei cibi, passeremmo buona parte delle nostre giornate masticando laboriosamente alimenti crudi, come gli scimpanzè. Oltre a renderli più appetibili, la cottura ammorbidisce i cibi e trasforma amidi e proteine in molecole di più facile digestione, permettendoci di consumare pasti gradevoli e nutrienti. Secondo Richard Wrangham, bioantropologo della Harvard University, il maggiore vantaggio della cottura è che ci lascia più tempo ed energia da dedicare ad altre attività, come far funzionare un grande cervello, formare rapporti sociali,e organizzare la divisione del lavoro. In pratica, secondo Wrangham, la cottura ci ha reso umani.

La documentazione archeologica è incerta sull'epoca in cui i nostri antenati cominciarono a controllare il fuoco, ma Wrangham sostiene che le testimonianze biologiche non lasciano dubbi: i nostri antenati apprezzarono il profumo del primo arrosto circa 1,9 milioni di anni fa. È l'epoca in cui apparve *Homo erectus*, che aveva un cranio del 50 per cento più grande e un bacino e una gabbia toracica più piccoli rispetto agli ominidi precedenti: caratteri che denotano la comparsa di un cervello più voluminoso e di un addome più piccolo. Anche la dentatura divenne meno potente. È logico pensare «che l'adozione della cottura abbia lasciato una traccia riconoscibile nella documentazione fossile – afferma Wrangham – e questa è l'epoca che si adatta meglio». In nessun altro momento dell'evoluzione umana si è avuto un cambiamento altrettanto evidente delle dimensioni dei denti, del cranio e del bacino. Se la cottura dei cibi fosse stata introdotta in un'epoca diversa, prosegue, ci troveremmo di fronte a un vero e proprio enigma: «Come è possibile che questa innovazione *non* abbia modificato la morfologia umana?».

Wrangham ha anche un'ipotesi su come ebbe origine il controllo del fuoco. Secondo la sua teoria, gli australopitechi, predecessori di *H. erectus*, mangiavano carne cruda dopo averla assottigliata e ammorbidita con un pestello, come si fa per preparare una tartara. «Se pesti la carne con una pietra ogni tanto si sviluppano scintille. Via via che il fenomeno si ripete, prima o poi si intuisce come far accendere il fuoco.» *Melinda Wenner*

**UNA TOMBA EGIZIA di oltre 4000 anni fa conserva un rilievo con l'immagine della preparazione del pane.**

## OROLOGI

### Secondo alcuni fisici, sono sempre esistiti

Meridiane e clessidre sono antiche quanto la civiltà; gli orologi meccanici (e, con essi, la parola «orologio») risalgono invece all'Europa del XIII secolo. Nessuna di queste invenzioni, però, fa qualcosa che la natura non faccia già per conto suo: la Terra che ruota è un orologio; una cellula che si divide è un orologio; gli isotopi radioattivi sono orologi. L'origine degli orologi non è quindi una questione che riguarda la storia, quanto la fisica.
E qui cominciano i problemi. Si potrebbe pensare che gli orologi siano oggetti che misurano il tempo. Stando però ai due pilastri della fisica moderna, il tempo non è misurabile. La teoria quantistica descrive il modo in cui il mondo cambia nel tempo; noi osserviamo quei cambiamenti e ne deduciamo il passaggio del tempo, ma il tempo in sé è intangibile. La teoria generale della relatività di Einstein si spinge ancora più in là, affermando che il tempo non ha alcun significato oggettivo. Di fatto, il mondo non cambia nel tempo, ma è un gigantesco orologio fermo. Questa scioccante rivelazione è nota come il problema del tempo.
Ma se gli orologi non indicano il tempo, allora che cosa indicano? Una recente teoria suggerisce che ciò che noi percepiamo come «cambiamento» non sia in realtà una variazione nel tempo, ma una diversa distribuzione delle componenti dell'universo. Per esempio, quando la Terra è in una certa posizione lungo la sua orbita, anche gli altri pianeti sono in specifiche posizioni nelle rispettive orbite. Il fisico Julian Barbour ha sviluppato questa visione relazionale del tempo in un articolo che ha vinto il concorso annuale indetto dal Foundational Questions Institute. Secondo Barbour, a causa di queste disposizioni del cosmo, ogni pezzo dell'universo sarebbe un microcosmo del tutto. Si potrebbe, per esempio, usare l'orbita della Terra come riferimento per ricostruire la posizione degli altri pianeti. In altre parole, l'orbita terrestre sarebbe un orologio che però non misura il tempo, ma la posizione degli altri corpi celesti.
Secondo il ragionamento di Barbour, tutti gli orologi sono imprecisi, perché non esiste un pezzo del sistema che sia in grado di catturare perfettamente il tutto. Ogni orologio prima o poi perde un colpo, va indietro o si ferma. L'unico vero orologio è l'universo stesso. In un certo senso, quindi, gli orologi non hanno un'origine, ci sono sempre stati. Anzi, sono proprio essi che rendono possibile il concetto di «origine». *George Musser*

## GAMBE, PIEDI E DITA

### L'evoluzione acquatica degli arti terrestri

L'evoluzione dei pesci in creature terrestri potrebbe essere iniziata per la necessità di respirare un po' d'aria fresca. Gli animali dotati di arti, piedi e dita, collettivamente noti come tetrapodi (letteralmente, «con quattro piedi») comparvero tra i 380 e i 375 milioni di anni fa.
Gli scienziati hanno creduto a lungo che gli arti si fossero sviluppati come un adattamento alla vita sulla terraferma. In base a scoperte recenti, invece, pare che alcuni cambiamenti fondamentali nella transizione dalle pinne alle zampe si siano verificati quando i progenitori dei tetrapodi vivevano ancora in acqua.
Gli esperti – come Jennifer Clack, dell'Università di Cambridge – ipotizzano che questi primi cambiamenti nelle ossa e nelle articolazioni delle pinne pettorali potrebbero aver fornito un doppio vantaggio agli antenati dei tetrapodi. Da un lato, visto che vivevano in acque basse e piene di vegetazione, avrebbero consentito loro di sollevarsi sulle estremità anteriori e di tirar fuori la testa dall'acqua per respirare un po' d'aria. (Anche cambiamenti in altre parti dello scheletro, come il cranio e il collo, facilitarono la respirazione dell'aria.) In secondo luogo i protoarti potrebbero aver aiutato quegli animali a spostarsi sul fondo e ad ancorarsi resistendo alla corrente mentre attendevano le prede.
Un tempo i ricercatori pensavano che le ossa dei piedi e delle dita fossero un'innovazione evolutiva esclusiva dei tetrapodi. Negli ultimi anni, tuttavia, le analisi di progenitori dei tetrapodi come il fossile di Tiktaalik ritrovato nel 2006 hanno rivelato che quelle ossa derivano direttamente dalle ossa delle pinne. Curiosamente, i primissimi tetrapodi e i pesci simili a essi avevano dalle sei alle otto dita, invece delle cinque dei loro parenti moderni. Non si sa perché quasi tutti i tetrapodi abbiano sviluppato arti con cinque dita, ma è probabile che questa conformazione abbia dato all'articolazione della caviglia il compromesso ottimale tra stabilità e flessibilità. *Kate Wong*

## BANCONOTE

### Da sostituto delle monete a passaporto per la globalizzazione

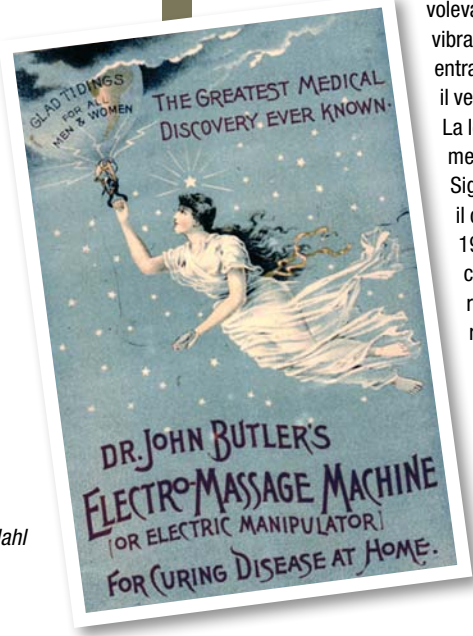
Tutta colpa delle banconote. È stato lo sviluppo del denaro cartaceo in Cina più di mille anni fa, infatti, ad accelerare l'accumulo di ricchezza, la spesa a debito e l'estensione del credito, preparando il terreno per l'attuale crisi finanziaria. Quando, durante la dinastia Tang (tra il 618 e il 907 d.C.), i mercanti cinesi iniziarono a usare forme cartacee di denaro, non potevano certo immaginare quali conseguenze avrebbe avuto la loro invenzione. All'epoca, l'introduzione di certificati che potevano essere riconvertiti in monete alla fine di un lungo viaggio portava grandi benefici. La carta alleggeriva infatti il carico dei mercanti, consentendo di trasportare grosse somme di denaro per lunghe distanze.
La pratica si diffuse in tutta la nazione nel X secolo, quando una carenza di rame costrinse l'imperatore a emettere le prime banconote, grazie anche a una serie di invenzioni già presenti in Cina (tra cui la carta, l'inchiostro e il timbro). Quando Marco Polo visitò l'impero mongolo, nel XIII secolo, rimase impressionato dalle sofisticate zecche di Kublai Khan, al servizio di un'economia apparentemente fiorente. (L'esploratore mancò però di notare i segni dell'inflazione causata dalla rapida stampa delle banconote.) Più tardi la circolazione più veloce del denaro consentì alle nazioni europee di drenare risorse dall'Asia e dall'Africa, alterando in maniera fondamentale gli equilibri globali.
Oggi il denaro di carta significa che la ricchezza è in grado anche di tornare ai paesi in via di sviluppo. La convertibilità valutaria permette alla Cina l'acquisto di buoni del tesoro degli Stati Uniti, finanziando un debito che potrebbe non essere mai ripagato. Allo stesso tempo, però, accelera il ritmo dell'accumulo di ricchezze. Il denaro cartaceo (insieme al suo erede moderno, il commercio elettronico) è dietro alle recenti bolle immobiliari e delle materie prime, e ha contribuito al tracollo finanziario del 2008. Con la recessione di oggi, il cerchio si è chiuso. Preoccupati per la stabilità finanziaria, alcuni investitori stanno infatti acquistando metalli preziosi, segnando una fuga dalle forme di denaro più astratte e un ritorno alle nostre origini economiche. Secoli dopo la conversione alla carta, il prezzo dell'oro ha ripreso ad aumentare. *Mara Hvistendahl*

Getty Images (*banconote*); cortesia Bakken Museum (*pubblicità*); Raúl Martín (*a fronte*)

## VIBRATORE

### È stato uno dei primi apparecchi elettrici a entrare nelle case: come presidio medico

Per essere un giocattolo sessuale, il vibratore ha sorprendentemente origini cliniche e asettiche. Prescritto come cura per quella strana patologia che era l'isteria, ha avuto per decenni un'applicazione clinica come strumento terapeutico.
L'isteria, il cui nome deriva dalla parola greca che significa «utero», colpiva le donne in cui l'energia sessuale era trattenuta, o almeno così credevano guaritori e medici dell'antichità. Suore, vedove e zitelle erano particolarmente a rischio, ma in epoca vittoriana anche molte donne sposate ne furono colpite. Stando alle stime di due importanti medici, alla fine del XIX secolo tre quarti delle donne statunitensi erano a rischio.
La prescrizione dell'orgasmo clitorideo come trattamento per l'isteria risale ai testi medici del I secolo d.C. Le donne isteriche si rivolgevano in genere a un medico, il quale le curava con le proprie mani inducendo in esse un «parossismo», termine dietro il quale si celava ciò che oggi conosciamo come orgasmo. La stimolazione manuale però richiedeva tempo ed era (almeno per il medico) noiosa.
In *The Technology of Orgams: «Hysteria», the Vibrator and Women's Sexual Satisfaction,* la storica della scienza Rachel P. Maines riferisce spesso che i medici passavano il lavoro alle levatrici. L'invenzione dell'elettricità semplificò le cose. Intorno al 1880 Joseph Mortimer Granville brevettò un vibratore elettromeccanico per alleviare i dolori muscolari, e i medici si resero rapidamente conto che poteva essere usato anche su altre parti del corpo. L'innovazione abbreviò i tempi della cura per l'isteria e riempì i portafogli dei medici.
Anche le pazienti erano contente. I centri di benessere che offrivano il trattamento con il vibratore si moltiplicarono e il servizio divenne così popolare che i produttori di vibratori ammonirono i medici a non esagerare con quel moderno dispositivo: accontentare tutte le richieste delle pazienti poteva rivelarsi stancante anche con il vibratore meccanico. Intorno all'inizio del XX secolo i cataloghi di vendite per corrispondenza pubblicizzavano modelli destinati alle donne che volevano provare a curarsi da sole; fu così che il vibratore divenne il quinto apparecchio elettrico a entrare nelle case, dopo la macchina per cucire, il ventilatore, il bollitore e il tostapane.
La legittimità del vibratore come dispositivo medico calò dopo gli anni venti, quando Sigmund Freud identificò correttamente il carattere sessuale del parossismo. Nel 1952 l'American Psychiatric Association cancellò l'isteria dall'elenco delle patologie riconosciute. Quando, anni dopo, il vibratore ritornò di moda, le donne non avevano più bisogno della scusa della malattia per giustificarne l'acquisto. *Mara Hvistendahl*

**I VIBRATORI SI DIFFUSERO come presidio medico per la cura dell'isteria femminile, sostituendo la stimolazione manuale da parte del medico.**

## PALLONI DA CALCIO E NANOTUBI

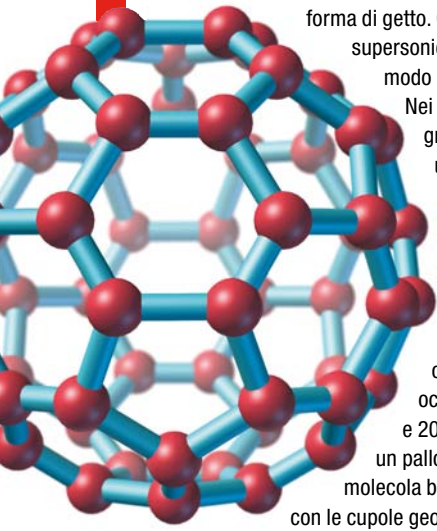
### Il futuro della tecnologia potrebbe passare per una forma del carbonio in passato sottovalutata dagli scienziati

I fullereni, una forma di carbonio solido diversa dal diamante e dalla grafite, sono stati scoperti nel 1985 alla Rice University da Richard E. Smalley, Robert F. Curl e Harold W. Kroto, quest'ultimo all'epoca in visita dall'Università del Sussex, in Inghilterra, insieme ai due dottorandi James R. Heath e Sean C. O'Brien. Il gruppo stava studiando il carbonio con un potente strumento che lo stesso Smalley aveva aiutato a sviluppare, uno spettroscopio laser per fasci supersonici di aggregati di materia. In questo sistema di analisi, un laser vaporizza piccole porzioni del campione; il gas risultante, composto da aggregati di atomi, viene raffreddato con elio e immesso in una camera a vuoto sotto forma di getto. Gli aggregati si espandono a velocità supersoniche, raffreddandosi e stabilizzandosi in modo da essere studiati.

Nei suoi esperimenti con la grafite, il gruppo della Rice aveva registrato un'abbondanza di aggregati di carbonio con dimensioni equivalenti a 60 atomi. Una scoperta bizzarra, perché all'epoca per il carbonio non erano note configurazioni stabili di 60 atomi. Dopo due settimane di discussioni gli scienziati arrivarono alla soluzione: ogni atomo di carbonio doveva occupare il vertice di 12 pentagoni e 20 esagoni disposti come le facce di un pallone da calcio. Chiamarono questa molecola buckminsterfullerene, vista l'analogia con le cupole geodetiche dell'architetto Buckminster Fuller. Ricerche successive hanno prodotto versioni allungate del buckminsterfullerene chiamate nanotubi e descritte nel 1991 da Sumio Iijima della giapponese NEC Corporation in uno storico articolo.

Sia le *buckyball*, cioè le molecole di buckminsterfullerene, sia i nanotubi potevano essere scoperti prima. Nel 1970 Eiji Osawa della Toyohashi University of Technology aveva ipotizzato che 60 atomi di carbonio si potevano disporre a forma di palla, ma non aveva prodotto risultati pratici. Nel 1952, invece, due ricercatori russi, L.V. Radushkevich e V.M. Lukyanovich, avevano descritto un procedimento per produrre filamenti tubolari nanoscopici di carbonio. Pubblicato in russo durante la Guerra Fredda, il loro articolo aveva ricevuto scarsa attenzione in Occidente.

In realtà il buckminsterfullerene non è difficile da produrre. Si forma spontaneamente in molti processi di combustione in cui c'è il carbonio, persino nella fiamma di una candela, e sue tracce sono presenti nella fuliggine. Dopo la scoperta alla Rice University, i ricercatori hanno trovato metodi più semplici per produrre buckyball e nanotubi: per esempio facendo passare un arco elettrico tra due elettrodi di grafite o un idrocarburo gassoso su un catalizzatore metallico. I nanotubi di carbonio sono molto interessanti. Tra le loro proprietà va ricordata la resistenza alla trazione, la più grande tra tutti i materiali noti: questi nanotubi sono in grado di resistere a tensioni 100 volte superiori rispetto a quelle a cui resiste il comune acciaio strutturale.

Nel 1993, in un'intervista per «Scientific American», Smalley (scomparso nel 2005 per leucemia) aveva dichiarato di non essere interessato a fare soldi con i fullereni. «Ciò che desidero è vedere che tra alcuni anni saranno usati per fare cose buone». Considerando che i nanotubi sono alla base di molte innovazioni in elettronica, energia, medicina e scienze dei materiali, è probabile che il suo desiderio diventerà realtà. *Philip Yam*

## PENSIERO ECONOMICO

### Anche scelte apparentemente irrazionali possono avere senso in termini di logica soggettiva

Buona parte del pensiero economico si basa sull'assunto che le persone sanno ciò che vogliono e prendono decisioni razionali per ottenerlo. Un simile comportamento esige che gli individui siano in grado di valutare e classificare i possibili esiti delle proprie azioni. In altre parole, che sappiano assegnare un valore alle cose.

Il valore dell'esito di un'azione, però, spesso non corrisponde al suo valore in termini di denaro. Supponiamo vi venga proposta questa scommessa: se puntate un euro, avete le stesse probabilità sia di raddoppiare la posta sia di perderla. Un individuo razionale rimarrebbe indifferente alla scelta tra giocare o non giocare: giocando tutti i giorni, in media non guadagnerebbe né perderebbe.

Ma – come il Capitano Kirk direbbe al Signor Spock – spesso la realtà è più forte della logica. O, come scrisse nel 1728 il matematico svizzero Gabriel Cramer al suo collega Nicolaus Bernoulli, «i matematici stimano il denaro in proporzione alla sua quantità; gli uomini di buon senso, in proporzione all'uso che possono farne». Certo, molte persone presentano «un'avversione al rischio» e rinuncerebbero alla possibilità di vincere un euro pur di essere sicuri di non perdere l'euro che hanno già, soprattutto se è l'unico che possiedono. Queste persone assegnano un valore maggiore all'esito che otterrebbero non giocando rispetto all'esito di una possibile perdita. Una persona propensa al rischio, invece, accetterebbe la scommessa.

L'idea di Cramer fu formalizzata da Daniel Bernoulli, statistico e cugino di Nicolaus, che creò il concetto di utilità attesa, cioè il valore implicito dato ai possibili esiti di una decisione, basato sul confronto tra tali esiti e quelli di una scommessa. Le persone avverse al rischio e quelle propense al rischio non sono irrazionali, prendono decisioni razionali basandosi sulla propria utilità attesa. In genere gli economisti presumono che la maggior parte delle persone sia razionale per la maggior parte del tempo, ossia che sappiano quale decisione massimizzerà l'utilità attesa delle loro scelte. (Il che richiede di valutare bene i rischi, cosa che le persone non sempre fanno.)

Alcuni esperimenti hanno però dimostrato che a volte le persone non valutano gli esiti in maniera coerente. In un esperimento del 1953 il matematico statunitense Kenneth May chiese a studenti universitari di valutare tre ipotetici candidati per il matrimonio, ognuno dei quali aveva una diversa qualità. Gli studenti preferirono l'intelligenza all'aspetto, l'aspetto alla ricchezza e la ricchezza all'intelligenza. *Davide Castelvecchi*

George Retseck

## CARBONIO

### Sinonimo di vita, questa molecola è nata nel cuore delle stelle

Nonostante la cattiva reputazione guadagnata di recente con i gas serra, il carbonio è sempre stato sinonimo di biologia. Basti pensare che le «forme di vita basate sul carbonio» sono, più semplicemente, «la vita così come la conosciamo» e che «molecola organica» significa «molecola a base di carbonio», anche quando non è coinvolto alcun organismo.

Tuttavia il sesto elemento della tavola periodica (e il quarto più abbondante nell'universo) non è sempre esistito. Il big bang produsse solo idrogeno, elio e tracce di litio, mentre tutti gli altri elementi, compreso il carbonio, furono prodotti in un secondo momento, principalmente grazie alla fusione nucleare all'interno delle stelle e alle esplosioni di supernova.

Alle incredibili temperature e pressioni tipiche del nucleo delle stelle, i nuclei degli atomi si scontrano e si fondono tra loro, formando nuclei atomici più pesanti. In una stella giovane, è soprattutto l'idrogeno che produce l'elio; successivamente la fusione di due nuclei di elio, ognuno formato da due protoni e due neutroni, produce un nucleo di berillio, composto da quattro protoni e quattro neutroni. Questo isotopo del berillio è però instabile, e decade molto rapidamente. In questa fase è quindi impossibile la formazione del carbonio e degli elementi più pesanti.

Tuttavia, con l'aumentare dell'età della stella la temperatura del nucleo sale fino a oltre 100 milioni di kelvin. Solo allora la produzione di berillio diventa sufficientemente veloce da garantirne una presenza costante. I rimanenti nuclei di elio possono allora scontrarsi con i nuclei di berillio e produrre carbonio. Successivamente si verificano altre reazioni, da cui nascono ulteriori elementi della tavola periodica, fino al ferro.

Quando all'interno della stella non rimangono più nuclei, la pressione verso l'esterno generata dalla fusione nucleare viene meno e l'astro collassa sotto il suo stesso peso. Se la stella è sufficientemente grande, si produce uno degli eventi più spettacolari dell'universo: l'esplosione di una supernova. Cataclismi di questo tipo sono un fatto positivo, perché grazie a essi il carbonio e gli altri elementi (alcuni formatisi durante l'esplosione stessa) si disperdono nella galassia, dove formeranno altre stelle, ma anche pianeti, forme di vita e… gas serra. *Davide Castelvecchi*

## PLACENTA

### Da una membrana interna del guscio d'uovo si è evoluto l'organo che permette la crescita del feto nei mammiferi

Più di 120 milioni di anni fa, mentre dinosauri giganti si scontravano in terribili combattimenti nelle foreste del Cretaceo, un evento più tranquillo aveva luogo nel sottobosco: qui alcune piccole creature pelose smettevano di deporre le uova e iniziavano a partorire i propri figli già in vita. Erano i progenitori di quasi tutti i mammiferi moderni (fanno eccezione l'ornitorinco e l'echidna, che ancora oggi «si ostinano» a deporre le uova).

Getty Images

Ciò che rende possibile il parto della prole viva nei mammiferi è un organo unico chiamato placenta, che avvolge il giovane embrione e controlla il flusso di nutrienti e di gas tra l'embrione stesso e la madre attraverso il cordone ombelicale.

La placenta si è apparentemente evoluta a partire dal corion, una sottile membrana che ricopre l'interno del guscio delle uova e, nei rettili e negli uccelli, aiuta l'embrione ad assorbire l'ossigeno. I canguri e gli altri marsupiali necessitano di una placenta molto rudimentale, perché dopo una breve gestazione i piccoli, delle dimensioni di un fagiolo, possono finire di svilupparsi nella tasca della madre, dove iniziano a succhiare il latte. Gli esseri umani e la maggior parte degli altri mammiferi hanno invece bisogno di una placenta che consenta di assorbire i nutrienti dal sangue della madre per tutta la durata della gestazione.

Studi recenti hanno mostrato che la complessità della placenta deriva in parte dal modo in cui diversi geni al suo interno vengono attivati nel corso del tempo. All'inizio dello sviluppo embrionale, sia la placenta del topo sia quella dell'uomo dipendono dallo stesso gruppo di geni che regolano la crescita cellulare, e che sono molto antichi. Successivamente, però, sebbene il suo aspetto rimanga lo stesso, nella placenta si attivano geni più recenti e più specifici di ciascuna specie. È in questo modo che la placenta riesce ad adattarsi alle diverse strategie riproduttive dei vari mammiferi.

Si considerino per esempio il topo, che dopo una gestazione di tre settimane dà alla luce una decina di piccoli o più, e l'uomo, che invece partorisce, di solito, un solo bambino dopo nove mesi.

Per durare più di una settimana o due, la placenta, che è in parte un organo del feto, deve impedire il rigetto da parte del sistema immunitario della madre. Per farlo, a volte può servirsi di un esercito mercenario di retrovirus endogeni, ossia geni virali già presenti nel DNA dei mammiferi. Alcuni di questi virus sono anche stati osservati mentre si formavano sulla membrana cellulare della placenta. I virus potrebbero avere un ruolo cruciale nel convincere il sistema immunitario della madre ad accettare la placenta, proprio come aiutano alcuni tumori a sopravvivere. *Davide Castelvecchi*

## PROSPETTIVA

### Il «realismo» nelle immagini dipende da presupposti culturali e abilità tecniche relativamente recenti

Le sonde spaziali Pioneer 10 e 11 trasportano ciascuna una placca con il disegno di un uomo e di una donna, destinata ad alieni che dovessero incontrarle. Ma siamo sicuri che i destinatari del messaggio siano in grado di capirlo? Anche nel caso in cui gli extraterrestri notassero i segni e li identificassero come disegni, saprebbero interpretare correttamente le immagini in tre dimensioni?

Molte convenzioni artistiche che diamo per scontate sono frutto di invenzioni, e riflettono uno specifico contesto culturale (e, ovviamente, planetario). La vista prospettica sulla placca del Pioneer è un esempio: produce l'illusione della profondità mostrando gli oggetti distanti più piccoli di quelli vicini e facendo convergere le linee parallele verso un punto di fuga. Oggi ci sono programmi per computer che automatizzano questi passaggi e permettono agli artisti di creare immagini realistiche quasi senza sforzo.

Ma il realismo non è sempre stato tra le ambizioni degli artisti. Ci sono alcuni elementi della prospettiva che risalgono almeno al pittore greco Agatarco, vissuto nel V secolo a.C., ma una vera diffusione si ebbe solo con il Rinascimento. A Firenze, agli inizi del XV secolo, l'architetto Filippo Brunelleschi, servendosi di specchi (all'epoca una tecnologia nuova), dimostrò con quale fedeltà i suoi dipinti riproducessero la facciata degli edifici. Il suo lavoro ispirò pittori come Donatello, Masaccio e Domenico di Bartolo (*sopra*); Leon Battista Alberti si occupò invece della parte matematica. Nelle loro rigorose costruzioni geometriche, gli indizi naturali di profondità, come dimensioni, posizione verticale e disegni delle piastrelle erano coerenti tra loro per ottenere la massima verosimiglianza.

Per osservare un disegno in prospettiva è necessario accettare e ignorare le sue limitazioni, per esempio un punto di vista singolo. Nel campo della computer grafica, la prospettiva è perfetta per i giochi «sparatutto» in soggettiva; per giochi come SimCity, invece, che usano una vista dall'alto, è preferibile una tecnica diversa, la proiezione assonometrica, in parte risalente ai pittori cinesi del II secolo a.C. In definitiva, non solo dovremmo chiederci se gli alieni saprebbero decifrare i nostri disegni, ma anche se noi, davanti a un'opera d'arte aliena, sapremmo riconoscerla. *George Musser*

Alfredo Dagli Orti/The Art Archive (*dipinto*); George Retseck (*graffetta*); Photo Researchers, Inc. (*antrace*)

## GRAFFETTA

### Ha molti difetti, ma è probabile che la sua forma resisterà a lungo

L'abitudine di assicurare insieme i fogli di carta esiste più o meno da quando i cinesi inventarono questo materiale nel I o II secolo d.C. Tuttavia, secondo l'Early Office Museum, che si occupa della conservazione delle attrezzature da ufficio del passato, la prima graffetta formata da filo di ferro piegato fu brevettata per la prima volta nel 1867, da un certo Samuel B. Fay.

L'iconica forma della graffetta che tutti conosciamo (e che venne prodotta per prima dalla Gem Office Products) comparve intorno al 1892 e non fu mai brevettata. Henry Petroski, storico della tecnologia, ha scritto che la sua nascita dovette attendere la disponibilità del giusto tipo di filo di ferro e di macchinari che riuscissero a piegarlo abbastanza velocemente da abbassare il prezzo di una scatola di graffette a pochi centesimi di dollaro.

Sia le graffette sia la macchina per produrle derivano dalla fabbricazione degli spilli. All'inizio del XIX secolo, infatti, negli uffici si infilzavano i fogli con spilli e un particolare tipo di spillo detto «spillo a T» è venduto ancora oggi. I macchinari dell'era vittoriana avevano già risolto il problema di convertire il filo in spilli a larga scala e a basso costo. L'adattamento delle macchine alla piegatura del filo comportò solo piccole modifiche, e liberò la creatività dei progettisti che speravano di arricchirsi con nuovi tipi di graffetta.

Oggi in commercio ci sono graffette di plastica, graffette di ferro ricoperte di plastica colorata e foglietti semicircolari di alluminio che si piegano sugli angoli superiori dei fogli di carta. Ci sono poi spilli a T, molle fermafogli e fermagli con le forme più svariate. Questi prodotti hanno in parte intaccato la fetta di mercato del classico prodotto Gem.

Se però state pensando di inviare alla Gem il vostro progetto per una versione migliore di graffetta, ripensateci. La graffetta Gem può rigare o strappare la carta, si impiglia con altre graffette nella scatola e, se aperta troppo, scivola via dai fogli. L'azienda ha stimato di ricevere almeno dieci lettere al mese in cui vengono suggeriti progetti alternativi. Ma per la maggior parte delle persone la Gem è «la graffetta», radicata nella cultura dell'ufficio quanto la tastiera *qwerty*. *Peter Brown*

## ANTRACE

### L'enigma del suo contagio mortale ha contribuito a modernizzare la medicina

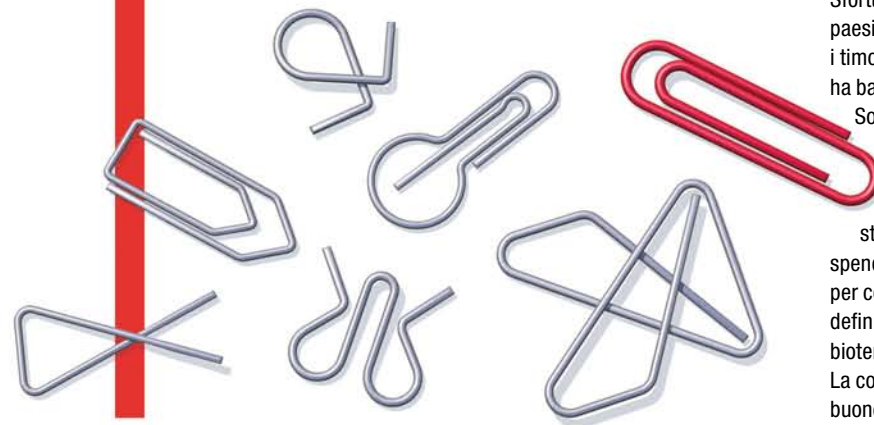
Tra le malattie umane e animali, l'antrace è una delle più antiche, e senza dubbio una delle più raccontate. (Si pensa che il «morbo acheo» descritto da Omero nell'*Iliade* fosse proprio antrace.) Un tempo molto diffusa tra gli erbivori, l'antrace era anche un pericolo per gli esseri umani che per lavoro entravano in contatto con pelli e animali infetti.

La causa di questa malattia però rimase un mistero fino a quando, nel XIX secolo, Robert Koch, uno sconosciuto medico di campagna tedesco, riuscì a identificarla e a sconfiggerla.

Negli anni settanta del XIX secolo, Koch volle verificare se le morti per antrace registrate in alcuni capi di bestiame fossero causate da batteri dalla forma allungata (isolati per la prima volta dieci anni prima da scienziati francesi) scoperti nel sangue degli animali. Nonostante la mancanza di attrezzature scientifiche, Koch svolse in casa sua una lunga serie di esperimenti per valutare le possibili vie di trasmissione. Nel 1876 raccolse i suoi vetrini e partì in treno per Breslavia, dove parlò a una sala gremita di esperti, convincendoli che le spore rilasciate dai batteri oggi noti come *Bacillus anthracis* erano in grado di sopravvivere nel terreno e di propagare l'infezione a nuovi ospiti. Partendo da quella scoperta, Louis Pasteur, sul cui lavoro Koch si era basato, creò in meno di quattro anni un vaccino contro l'antrace.

Da quel momento, la scienza medica cambiò. Sotto la spinta di analoghi successi contro tubercolosi e colera, il nuovo modello sostituì la visione predominante, secondo cui le malattie si generavano spontaneamente (guidate da chissà quali forze oscure). Le malattie furono finalmente identificate come conseguenza di contaminanti e organismi patogeni.

Sfortunatamente, a partire dagli anni trenta del XX secolo, diversi paesi hanno modificato le spore di antrace per uso bellico, rinnovando i timori per questa antica malattia. Nel 1972 un trattato internazionale ha bandito lo sviluppo delle armi biologiche, ma sembra che l'Unione Sovietica e altri paesi abbiano continuato a sviluppare l'antrace ancora per diversi anni. Poi, nel 2001, dopo gli attacchi dell'11 settembre, ci sono stati i casi delle buste all'antrace spedite per posta. Questi casi, rimasti irrisolti, hanno costretto agli straordinari i laboratori di produzione dei vaccini e hanno fatto spendere inutilmente quasi 5 miliardi di dollari in ricerca e sviluppo per contrastare quello che i Centers for Disease Control and Prevention definiscono un «agente di classe A» (categoria che indica le minacce bioterroristiche più pericolose per la salute pubblica).

La conoscenza scientifica può dare o togliere la vita, dipende dalle mani, buone o cattive, in cui finisce. *Bruce Grierson*

## TERGICRISTALLI

### Questo accessorio comune a tutti i veicoli ha messo il suo inventore contro l'intera industria automobilistica

A volte anche la più semplice delle tecnologie viene ricordata non per l'ingegno del suo inventore, ma per le infinite dispute legali riguardanti la sua nascita. Negli annali delle più famose cause per violazione di brevetti, un posto speciale spetta al tergicristallo intermittente. La genesi di questo utile ma apparentemente secondario accessorio delle automobili moderne ha attirato addirittura gli sceneggiatori di Hollywood, in cerca di una versione contemporanea della storia di Davide e Golia, poi diventata *Flash of genius*, uscito in Italia nel 2009.

Il film racconta di Robert Kearns, professore universitario brillante e un po' eccentrico. Reso quasi cieco da un tappo di champagne stappato durante la sua festa di matrimonio nel 1953, qualche tempo dopo Kearns scoprì che il movimento monotono del tergicristallo irritava la sua già debole vista. (Questa è almeno la versione ufficiale.)

Nel 1963 Kearns usò componenti elettronici disponibili nei negozi per costruire un tergicristallo che pulisse il vetro e poi si fermasse. L'ingegnere mostrò il sistema alla Ford, senza però rivelare alcun dettaglio sul suo funzionamento. Ma la casa automobilistica decise di non acquistare i tergicristalli dall'azienda di Detroit a cui Kearns aveva concesso il brevetto, preferendo sviluppare un sistema proprio.

Nel 1976 Kearns, che nel frattempo aveva trovato lavoro al National Bureau of Standards, smontò un tergicristallo in commercio, scoprendo che l'azienda produttrice aveva copiato il suo sistema. Sulle prime ebbe esaurimento nervoso, ma una volta ripresosi iniziò una battaglia legale, terminata negli anni novanta, per ottenere il dovuto. Nella preparazione dei processi contro le più grandi case automobilistiche del mondo Kearns coinvolse i suoi figli, nominandosi anche consulente legale di se stesso. Alla fine i giudici stabilirono che Ford e Chrysler avevano violato i brevetti di Kearns, e imposero un risarcimento di 30 milioni di dollari.

Secondo i critici, le invenzioni di Kearns violavano uno dei criteri della brevettabilità, ossia che un'invenzione non dovrebbe essere «ovvia» a un esperto del settore. Secondo la Ford, infatti, un timer elettrico (questa era in sostanza l'invenzione di Kearns) era «ovvio». Tuttavia Kearns vinse la causa contro Ford e Chrysler (ma non nei casi successivi), diventando un paladino di tutti i piccoli inventori.

*Gary Stix*

## OCCHIO

### A che serve metà occhio? A molto...

Fabrice Lerouge/Getty Images

Una delle argomentazioni preferite dei creazionisti afferma che uno strumento complesso come l'occhio (provvisto di iride per regolare la luce, cristallino per mettere a fuoco, retina composta da più strati di cellule fotosensibili e così via) non sarebbe mai potuto emergere dall'evoluzione darwiniana. Come avrebbero potuto delle mutazioni casuali generare e assemblare spontaneamente parti che, prese individualmente, non avrebbero alcuna funzione? «A che servirebbe metà occhio?», chiedono ironicamente i creazionisti, per i quali quest'organo sarebbe la prova più evidente dell'esistenza di Dio.

In realtà anche Charles Darwin in *L'Origine delle specie* riconobbe che l'occhio sembrava contraddire la sua teoria. Ma esaminando i reperti fossili, le varie fasi dello sviluppo embrionale e i diversi tipi di occhio presenti nel mondo animale i biologi hanno individuato una serie di passaggi evolutivi che potrebbero aver prodotto quest'organo come lo conosciamo oggi.

La struttura di base degli occhi, infatti, è simile in tutti i vertebrati, comprese le lamprede, separatesi dalla nostra linea evolutiva circa 500 milioni di anni fa. A quell'epoca, dunque, tutte le funzioni di base dell'occhio dovevano già essere presenti, afferma Trevor Lamb della Australian National University.

Ma i parenti più prossimi dei vertebrati, le missine (animali con un cranio cartilagineo e nessun altro osso), hanno solo occhi rudimentali composti da una struttura conica sottocutanea priva di cornea, cristallino e muscoli, la cui funzione probabilmente è solo quella di misurare l'intensità della luce nei profondi fondali sabbiosi dove vivono queste creature.

Probabilmente il nostro occhio si è evoluto dopo la separazione della nostra linea evolutiva da quella delle missine, forse 550 milioni di anni fa, secondo Lamb. È probabile che gli animali più primitivi avessero, all'interno del cervello, aree con cellule fotosensibili per distinguere la luce dal buio e il giorno dalla notte. Quelle zone si sono poi riorganizzate in strutture simili a sacche, come nelle missine, consentendo agli animali primitivi di distinguere la direzione di provenienza della luce. Successivi miglioramenti avrebbero poi consentito la visione di immagini approssimative, come nel caso del nautilo, mollusco i cui occhi funzionano come una macchina fotografica a foro stenopeico. In seguito l'ispessimento di strati di pelle trasparente ha generato il cristallino. Il concetto importante è che a ogni stadio l'occhio «incompleto» forniva comunque un vantaggio in termini di sopravvivenza rispetto alle versioni precedenti.

Secondo i biologi, questi cambiamenti potrebbero essere avvenuti nell'arco di 100.000 generazioni, un batter d'occhio in termini geologici. Un'evoluzione così rapida potrebbe essere stata motivata dalla sopravvivenza, visto che molti invertebrati stavano sviluppando sistemi visivi. «C'è stata una corsa agli armamenti», spiega Lamb. «Appena un animale sviluppava degli occhi e ti mangiava, diventava fondamentale sfuggirgli».

*Davide Castelvecchi*

Don Farrall/Getty Images (*diamante*); Corbis (*pillole contraccettive*)

## DIAMANTE

### La sua durezza è naturale, il suo valore no

Un diamante è per sempre. Come lo zaffiro, la silice e il polistirolo. Si tratta della più dura sostanza naturale conosciuta e per questo motivo è considerato un eccellente materiale da taglio. Non si spiega invece perché sia diventato anche il simbolo dell'amore romantico. I diamanti, infatti, non sono più rari di altri minerali né particolarmente affascinanti. In realtà, anche se queste pietre sarebbero state generate miliardi di anni fa nelle profondità del mantello terrestre, il loro significato attuale è frutto di una vicenda moderna.

Nel 1870 le compagnie minerarie britanniche scoprirono enormi giacimenti di diamanti in Sudafrica. Fino ad allora, come materia prima, i diamanti erano stati piuttosto rari; le nuove scoperte rischiavano quindi di inondare il mercato e di farne crollare il prezzo. Gli investitori che finanziavano le miniere capirono che dovevano unirsi se volevano controllare il flusso di diamanti sul mercato. Così nel 1888 nacque la De Beers Consolidated Mines Ltd. Accantonando la produzione in eccesso per mantenere alti i prezzi, il gruppo è riuscito a controllare l'offerta mondiale di diamanti per tutto il secolo successivo.

Il passo successivo era il controllo della domanda. Nel 1938 la De Beers si rivolse alla società statunitense di pubbliche relazioni N.W. Ayer per avviare la prima campagna pubblicitaria finalizzata a vendere un'idea: che un diamante fosse l'unico simbolo accettabile di amore eterno. La società iniziò a inserire storie su quotidiani e riviste in cui venivano enfatizzate le dimensioni dei diamanti che le star del cinema si scambiavano; fotografie a colori delle celebrità che mettevano in mostra le proprie pietre contribuirono a consolidare il collegamento.

Lo slogan «un diamante è per sempre» entrò nel lessico comune nel 1949, e quando la generazione nata nel dopoguerra raggiunse l'età da matrimonio, l'anello di fidanzamento con diamanti era già diventato un simbolo non negoziabile di corteggiamento e prestigio.

Le leggi antitrust introdotte all'inizio di questo decennio hanno messo fine al monopolio della De Beers, costringendola a interrompere gli accantonamenti. La De Beers però è stata sostituita dalla Alrosa, società per il 90 per cento di proprietà del governo russo, che quest'anno è diventata il maggiore produttore mondiale di diamanti. La Alrosa, preoccupata per un possibile crollo dei prezzi a causa della crisi globale, non vende pietre dal dicembre 2008. Il portavoce Andrei V. Polyakov ha spiegato al «New York Times»: «Se il prezzo non viene tenuto alto, i diamanti diventano semplici pezzi di carbonio».

*Michael Moyer*

## PILLOLA

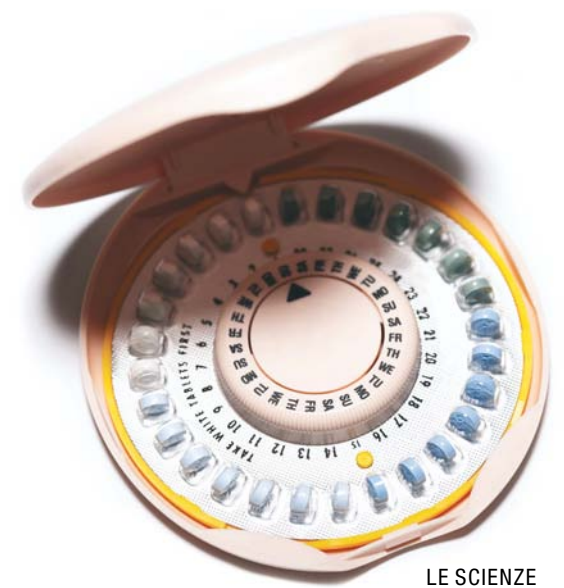
### Dall'infertilità alla libertà riproduttiva

Il contraccettivo orale, tanto diffuso da essere conosciuto come «pillola», fu per decenni il sogno di Margaret Sanger, storica sostenitrice della pianificazione familiare. In realtà, però, nessuno degli uomini che realizzarono il sogno della Sanger aveva in mente quell'obiettivo. Negli anni trenta la scienza iniziò a scoprire il ruolo degli ormoni steroidei nel corpo umano e a ipotizzarne un possibile applicazione terapeutica. Ma l'estrazione di ormoni dagli animali aveva costi proibitivi per la maggior parte delle applicazioni mediche. Nel 1939 Russell Marker, chimico della Pennsylvania State University, mise a punto un metodo per produrre gli steroidi dalle piante. (Il suo metodo è alla base della moderna produzione di ormoni.) Poco tempo dopo la Syntex, azienda fondata da Marker, sviluppò un progesterone sintetico iniettabile da una varietà selvatica di igname.

Il progesterone era un farmaco molto promettente nella cura delle irregolarità mestruali legate all'infertilità, visto che impedisce l'ovulazione durante la gravidanza e in alcuni periodi del ciclo mestruale. Nel 1951 Carl Djerassi, chimico della Syntex, sintetizzò una progestina di origine vegetale da assumere per via orale.

Quando la Sanger, insieme alla sua ricca benefattrice Katharine Dexter McCormick, propose nel 1953 a Gregory Pincus, ricercatore nel campo degli steroidi, di produrre una pillola contraccettiva, lo scienziato stava lavorando per la Worcester Foundation for Experimental Biology, piccola azienda del Massachusetts in difficoltà economiche. Vent'anni prima, però, alla Harvard University, Pincus aveva scandalizzato i benpensanti eseguendo con successo una fertilizzazione in vitro di conigli. La Sanger era convinta che Pincus avesse il coraggio e le competenze per produrre la pillola desiderata.

Pincus si rivolse a John Rock, medico esperto di infertilità, che stava già usando il progesterone sulle pazienti per sospendere l'ovulazione per alcuni mesi, nella speranza che ritornassero fertili. Proteggendosi ancora dietro il paravento della ricerca sull'infertilità, nel 1954 Rock e Pincus condussero il primo esperimento, iniettando progestine sintetiche a 50 donne per tre mesi. L'ovulazione cessò in tutte le volontarie, e riprese solo dopo l'interruzione della somministrazione dei farmaci. Seguirono anni di sperimentazioni, e nel giugno 1960 la prima pillola contraccettiva fu approvata negli Stati Uniti.

*Christine Soares*

# Ritorno all'origine

Ricordarsi dove è parcheggiata l'auto non è sempre facile, se poi invece di una griglia bidimensionale di parcheggi se ne considera una tridimensionale…

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

«Die ganzen Zahlen hat der liebe Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk!».

Che fosse una citazione, lo si capiva dal tono solenne con il quale Rudy l'aveva declamata: dritto in piedi, la pipa agitata sopra la testa per esortare l'uditorio all'attenzione. E almeno un po' dell'attenzione di Alice il novello retore la ottiene.

«E questo che c'entra, adesso?».

«Ah! Hai capito cosa ho detto! Dopo francese e inglese, anche il tedesco è ormai senza segreti, per me!».

Avanza a grandi passi lungo una via del centro, verso un vetusto edificio di architettura tardosabauda da cui escono frotte di ragazzini vocianti. «"In principio Dio creò i numeri interi. Il resto è opera dell'uomo". Questo aforisma di Kronecker è veramente la *Genesi*, per i matematici. E poiché volevo parlarvi di origini…».

«Mi dispiace GC – lo interrompe Piotr – ma il principio non c'è».

Rudy si volta verso i due amici. Si blocca in mezzo al marciapiede con aria corrucciata, mentre file ininterrotte di ragazzini in grembiule gli sfilano ai lati, appesantiti dagli zaini e alleggeriti dalle risate.

«Che farnetichi? Che vuol dire che non c'è il principio?».

«Solo che non c'è», sospira Piotr, imbarazzato. «La frase originale è giusta, ma la traduzione è troppo libera: in realtà dice "Il buon Dio ha creato i numeri interi, tutto il resto è opera dell'uomo". E il principio non c'è. È solo nella *Genesi* vera».

«Dovrei crederti? Da quando conosci il tedesco?».

«Non lo conosco. Però conosco le citazioni matematiche, e questa è famosa».

«Va bene, va bene. Niente principio nell'aforisma di Kronecker. Quindi niente origini. Tanto non servirebbe mica un così elaborato intervento divino, per creare la matematica. Tutti gli interi! Che spreco… basta l'insieme vuoto e una relazione di ordinamento, dice Conway, e si possono creare non solo tutti gli interi, ma anche altri tipi di numeri e un bel po' di razionali».

Alice storce il naso, e fissa Rudy negli occhi: «Sarà, GC. Però hai l'aria delusa, e non ci hai ancora spiegato che cosa ci facciamo di fronte a questa scuola».

Rudy si guarda intorno un po' imbarazzato. «Beh, è sempre per quella storia delle origini: qui ci sono le mie. Pensateci: tutte le avventure intellettuali iniziano così, dentro una scuola elementare! Questa è la mia: ancora bellissima e in piena funzione, vedete?».

«Perdiana, questa non me l'aspettavo», fa Doc. «Il Capo che sotto la dura scorza lascia intravedere un cuore! Mi ricordi zio Paperone in una vecchia storia di Carl Barks, quando ripensa a Doretta Doremì…».

«Fai poco lo spiritoso, io intanto alle origini ci sono tornato davvero, tu non saresti in grado di farlo neppure virtualmente».

Illustrazioni di Stefano Fabbri

Prima che Piotr si lanci in nostalgie da emigrante, Rudy estende l'argomento. «Origini? Origine, perdiana! In matematica, dove vuoi che si trovi, l'origine? Ma all'incrocio degli assi, no? Tutto parte dall'origine!».

«Tutto partirà dall'origine, ma chi vuoi che ci torni? A parte te, Cuoretenero d'Alembert…».

«Parli senza cognizione di causa. Il mio problema preferito tratta proprio di ritorno all'origine! Ma che parlo a fare con te… potrei parlarne con Alice, che sa ascoltare. Solo che…».

«Solo che…? Finisci la frase».

Rudy si volge a Treccia e fa la faccia triste, ma si vede benissimo che fa finta.

«È un bel problema, ma… tratta di probabilità».

Alice guarda Doc, Doc guarda Alice. Non hanno ancora capito come abbia fatto, ma è evidente che Rudy sta per rifilargli un quiz (cosa che non piace a Piotr) di probabilità (cosa che non piace ad Alice). Con uno dei suoi migliori sogghigni, comincia: «Immaginate una città con isolati quadrati e vie perpendicolari e parallele…».

«Siamo nel pieno centro di Torino. Ti avrà mica ispirato, la cosa?».

«Non è campanilismo: mi va bene anche qualsiasi altra città che conservi la forma originale di accampamento romano. O perfino il centro di New York, se preferite. Allora, avete appena fatto bisboccia in un locale, che immagineremo posto all'origine del sistema di riferimento di questa città che non conoscete…».

«Veramente Torino la conosco piuttosto bene».

«Appunto, per questo suggerivo New York!».

«Non credo proprio che riuscirei a perdermi a Manhattan».

«Insomma! Un po' di collaborazione, perdinci! Diciamo Ulaanbaatar, allora! Probabilmente era un accampamento romano perfettamente squadrato, prima dell'avvento di Gengis Khan! D'accordo?».

Uno sguardo infuocato stronca sul nascere un paio di obiezioni.

«Bene! Uscite dal locale, dicevo. Dovete ritrovare la macchina, che non vi ricordate dove avete parcheggiato. Così, ogni volta che arrivate a un incrocio sceglierete a caso, con probabilità $p$ costante, se girare o tirare dritto; e se girate avete uguale probabilità per la svolta a destra o per la svolta a sinistra. In breve, avete probabilità $p/2$ di girare a sinistra, $p/2$ di girare a destra e $1-p$ di andare dritto».

«Uhm… Ma alla fine dove sta, la macchina?».

«A-ha! Qui vi volevo! La macchina è nell'origine! Parcheggiata proprio davanti al locale, ma quando siete usciti non l'avete notata a causa della bisboccia. Supponendo che, rinfrescati dalla frizzante aria della sera ulaanbaatarese, newyorchese o torinese che sia sareste in grado di riconoscere la vostra macchina se aveste la ventura di ripassarci davanti, quale valore deve avere $p$ per garantirvi, prima o poi, il ritorno all'origine?».

«Non solo probabilistico, anche difficile… Doc, che è quell'aria assorta?».

«La metro. C'è la metropolitana a Ulanbaatar? Perché New York ce l'ha, Torino quasi, e se l'avesse… Voglio dire, se la città avesse l'asse zeta? Insomma la griglia fosse 3D anziché 2D? Come finirebbe la ricerca della macchina in questa iperTorino?».

«Incredibile! Sentito, Treccia? Doc, anziché scappare, generalizza il problema! Ehi, mi ascolti?».

«Eh? Scusa, pensavo… e se considerassimo, per semplicità, una Ulaanbaatar frattale…?».

## Il problema di ottobre: i giochi del filetto

Il mese scorso parlavamo di varianti del filetto. Per il filetto «Pari e Dispari», il primo giocatore vince 6 a 2 occupando la casella centrale; dovrà metterci 0 se è il giocatore dispari e 1 se invece è il pari: poi basta mettere il numero opposto a quello dell'avversario in posizione simmetrica rispetto al centro. Nel «Morpion», con griglia di lato pari, occorre immaginare una divisione in blocchi (*figura*): il secondo giocatore si assicura la patta se risponde subito alle mosse del primo occupando l'altra casella del rettangolo della sua giocata. Per griglie di lato dispari, rimandiamo al blog.

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di dicembre e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.